



**Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda  
Departamento de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica**

**Área de concentração em processamento e  
caracterização de materiais**

**Análise da variabilidade da resposta vibratória de  
violões projetados com madeiras amazônicas via  
simulação numérica**

**Roseli Felix da Silva Ribeiro**

**ROSELI FELIX DA SILVA RIBEIRO**

**Análise da variabilidade da resposta vibratória de violões projetados com madeiras  
amazônicas via simulação numérica**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em engenharia metalúrgica da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutora em engenharia metalúrgica com ênfase em Caracterização e Processamento de Materiais.

Orientador: ALEXANDRE FURTADO FERREIRA  
Coorientadores: JOSÉ FLÁVIO FEITEIRA e JAYME PEREIRA DE GOUVÊA.

**Volta Redonda**

**2019**

## AGRADECIMENTO

Sou completamente grata AO ETERNO, que não apenas me formou, mas me mantém sob seus cuidados continuamente e me ajudou a vencer todos os obstáculos que se apresentaram, me levando à conclusão desta pesquisa. Agradeço pela família que me deu, em especial por meus pais, que sempre se dedicaram ao melhor pra mim e meus irmãos. Sou grata por aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram durante estes quatro anos, assim como pelo tempo de vida que Ele concedeu ao professor Alexandre Silva (*in memoria*) e pela oportunidade de convivência e aprendizado. Agradeço pela vida do professor Alexandre Furtado, que com presteza aceitou assumir a orientação e muito contribuiu para esta conclusão; pela vida dos meus coorientadores, professores Feiteira e Jayme, companheiros desde o início neste projeto, sempre dispostos a ajudar e compartilhar seu conhecimento; e pela vida das professoras Anna Carla e Maria Lúcia, que tão atenciosamente aceitaram o convite de composição da banca. Assim, humildemente expresso minha ilimitada e irrestrita gratidão.

## **Resumo**

A rica biodiversidade das florestas brasileiras tem levantado discussões sobre as oportunidades que a aplicação da madeira pode trazer a diversos setores de produção. No centro destas discussões é pautado o uso consciente da floresta de modo a manter os recursos, mas, para que haja otimização no processo de produção, é necessário amplo conhecimento das propriedades do material de aplicação. Diante do atual interesse no uso de madeiras brasileiras que não são empregadas tradicionalmente na fabricação de instrumentos musicais e que possam substituir de forma razoável as espécies tradicionais, as propriedades mecânicas e acústicas de inúmeras espécies brasileiras têm sido investigadas vastamente e, nesta tese, buscou-se examinar a variabilidade de propriedades mecânicas de quatro espécies de madeira amazônica pré-selecionadas para a construção de violões e os efeitos de tal variabilidade na resposta acústica do instrumento. Realizaram-se, para isso, testes e mensurações experimentais para o cálculo dos módulos elásticos e da massa específica de corpos de prova preparados adequadamente para aplicação da técnica de excitação por impulso. O estudo da sensibilidade de um modelo numérico de caixa acústica de violão clássico também foi feito, bem como a análise experimental do instrumento em etapas consecutivas de construção, visando estimar possíveis perdas ao se utilizar o modelo numérico sem levar em conta braço e ponte. Os valores obtidos para os módulos elásticos dinâmicos e massa específica, calculados experimentalmente, foram aplicados ao modelo numérico de modo a se obter os conjuntos de frequências naturais da caixa de ressonância simulada em diferentes hipóteses de aplicação de madeiras amazônicas. A comparação entre os conjuntos foi realizada permitindo estimar as

frequências mais importantes no espectro e, em consequência, as alterações tímbricas inseridas.

*Palavras-chave: Anatomia da madeira, variabilidade mecânica da madeira, violão, frequências naturais, análise modal.*

## **Abstract**

The large biodiversity found in Brazilian forests has given rise to discussions about opportunities that applications of wood can bring to several production sectors. At the heart of these discussions is the conscious use of the forest aiming the maintenance of the resources, but it knows that the optimization of production process requires the widely knowledge of the wood properties. In this context, before the current interest in the use of Brazilian species that are not traditionally applied in the manufacture of musical instruments and that can reasonably replace traditional woods, mechanical and acoustic properties of several species have been investigated. In the present study, one sought to examine the mechanical properties variability of four Amazonian wooden species pre-selected for construction of acoustic guitars, and the effects of such variability on the instrument acoustic response. For this purpose, experimental tests and measurements were performed to calculate the elastic modulus and the density of specimens prepared properly for the application of the impulse excitation technique. The sensitivity of an acoustic box numerical model was examined and experimental analyses of the real instrument were performed in consecutive construction stages aiming to estimate possible losses when the numerical model without the neck and the bridge are employed. The values determined in the experimental characterization process were applied to the numerical model in order to acquire the acoustic natural response of acoustic guitar in different hypotheses of use of the Amazonian woods, and the masses and natural frequencies were obtained allowing estimate tonal and physical characteristics of the instrument by the comparison with the standard model in which traditional woods are considered.

Keywords: *wood anatomy, wood mechanical variability, acoustic guitar, natural frequency, modal analysis.*

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	15
1.1 – Objetivos.....	22
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 – A madeira .....	23
2.1.1 – Plantas produtoras de madeira.....	24
2.1.2 - Cerne e alborno .....	29
2.1.3 - As células da madeira.....	30
2.1.3.1 – Parede celular .....	38
2.1.3.2 – Variabilidade anatômica e seus efeitos.....	40
2.1.4 – Propriedades mecânicas da madeira .....	42
2.1.4.1 - Módulo de elasticidade .....	42
2.1.4.2 - Técnica de excitação por impulso (TEI).....	44
2.2 – O violão e seu comportamento vibroacústico .....	47
2.3 – Análise Modal .....	51
2.3.1 – Análise modal experimental .....	52
2.3.2 – Análise modal numérica .....	53
2.4 – As madeiras amazônicas.....	55
2.4.1 – Freijó.....	59
2.4.2 – Cedro rosa.....	60
2.4.3 – Maçaranduba .....	62
2.4.4 – Muiracatiara.....	63
2.5 – Levantamento de mercado.....	64
3 – DESENVOLVIMENTO.....	67
3.1 – Análise modal experimental do violão .....	68
3.2 – Análise da sensibilidade do modelo numérico .....	69
3.3 – Amostragem das madeiras.....	72
3.4 – Caracterização mecânica e análise de variabilidade.....	75
3.5 – Caracterização anatômica e análise de variabilidade .....	76
3.6 – Aplicação das propriedades de madeiras amazônicas ao modelo numérico .....	77
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79



4.1 – Frequências naturais dos sistemas acústicos caixa/braço e caixa/braço/ponte.....	79
4.2 – Sensibilidade do modelo numérico .....	82
4.3 – Caracterização mecânica e análise de variabilidade.....	87
4.3.1 – Freijó.....	88
4.3.2 – Cedro rosa.....	93
4.3.3 – Maçaranduba e da muiracatiara .....	98
4.4 – Análise anatômica e análise de variabilidade .....	101
4.4.1 – Grã .....	101
4.4.2 – Anatomia microscópica do freijó .....	103
4.4.3 – Anatomia microscópica do cedro rosa .....	104
4.4.4 – Anatomia microscópica da maçaranduba .....	107
4.4.5 – Anatomia microscópica da muiracatiara .....	109
4.4.6 – Análise gráfica e comparação das propriedades anatômicas.....	110
4.5 – Relação entre variabilidade mecânica e variabilidade anatômica .....	112
4.6 – Aplicação das propriedades de madeiras amazônicas ao modelo numérico .....	116
CONCLUSÕES .....	121
PESQUISAS FUTURAS.....	123
ANEXO A .....	124
ANEXO B .....	125
ANEXO C .....	128
ANEXO D .....	130
ANEXO E.....	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Figura 2.1: Formação de madeira no tronco, na raiz e nos galhos. ....	25
Figura 2.2: Corte transversal de um caule contendo os elementos internos de uma espécie produtora de madeira. ....	25
Figura 2.3: Formação de madeira no tronco. ....	27
Figura 2.4: Cerne e alburno. ....	30
Figura 2.5: Elementos da célula vegetal. ....	31
Figura 2.6: Processo de divisão da célula vegetal. ....	32
Figura 2.7: Estrutura básica da parede celular. ....	32
Figura 2.8: Células das madeiras de coníferas e folhosas. ....	34
Figura 2.9: Tecidos e elementos celulares na madeira de uma folhosa ( <i>Cedrela odorata</i> )	37
Figura 2.10: (A) Canais resiníferos de uma conífera; (B) Canais secretores radiais em uma folhosa. ....	38
Figura 2.11: Camadas da parede celular das células de sustentação e organização das microfibrilas nas paredes primárias e nas camadas S1, S2 e S3 da parede secundária. (Adaptado de Raven, Evert e Eichhorn (1996, apud Nigoski 2016, p. 12)). ....	39
Figura 2.12: Direções principais na madeira: L – longitudinal (paralela às fibras), R – Radial (perpendicular aos anéis de crescimento), T – Tangencial (tangente aos anéis de crescimento). ....	43
Figura 2.13: Modos de vibração da viga prismática. Regiões claras indicam pontos onde a amplitude de vibração é mínima e regiões mais escuras indicam os pontos de maior amplitude de vibração. Setas vermelhas indicam ponto, direção e sentido de aplicação do impulso para região de captação das vibrações e setas pretas indicam para o estímulo dos respectivos modos de vibração. ....	45
Figure 2.14: Locais de aplicação do impulso e captação do sinal sonoro resultante e condições de apoio do corpo de prova na determinação do módulo elástico longitudinal .	46
Figure 2.15: Componentes externos do violão. ....	47
Figura 2.16: Componentes internos da caixa acústica. ....	48
Figura 2.17: Tampos harmônicos com diferentes configurações de leque. ....	49
Figura 2.18: Regiões do tampo e configuração do leque harmônico aplicado. ....	50
Figura 2.19: A – face transversal; B – face radial; C – face tangencial (freijó). ....	60

Figura 2.20: A – face transversal; B – face radial; C – face tangencial (cedro rosa). .....	61
Figura 2.21: A – face transversal; B – face radial; C – face tangencial (maçaranduba). ....	63
Figura 2.22: A – face transversal; B – face radial; C – face tangencial (muiracatiara). .....	64
Figura 3.1: Organograma para apresentação dos procedimentos executados no desenvolvimento da tese .....	68
Figura 3.2: À esquerda, caixa de ressonância isolada; no meio, violão sem ponte (local de anexação da ponte indicado em laranja); à direita, pontos de aplicação dos impulsos. ....	69
Figura 3.3: Modelo numérico projetado .....	71
Figura 3.4: Padrão de dimensões do corpo de prova adotado para aquisição do módulo elástico via técnica de excitação por impulso.....	73
Figura 3.5: (A) Politriz utilizada na preparação da superfície dos corpos de prova. (B) Corpos de prova das espécies amazônicas examinadas.....	74
Figura 3.6: Amostra de feijó para exame da superfície transversal do corpo de prova .....	75
Figura 3.7: Sistema Sonelastic para aplicação da técnica de excitação por impulso em corpos de prova de tamanho médio .....	76
Figura 3.8: Posições do corpo de prova e do sensor acústico, e região de aplicação do impulso .....	76
Figura 3.9: Elementos e tecidos celulares na madeira.....	77
Figura 4.1: Espectros de frequências do violão nas etapas de construção examinadas (caixa isolada, caixa/braço e caixa/braço/ponte) após impulso na região central do bojo inferior	80
Figura 4.2: Conjuntos de frequências obtidas com o método de excitação por impulso nas três fases de construção do violão .....	81
Figura 4.3: Primeira e terceira colunas – modos de vibração observados na análise numérica da tese; segunda e quarta colunas – modos apresentados por Elejabarrieta 2002	83
Figura 4.4: Alterações nas frequências dos oito primeiros modos de vibração, apresentadas na simulação numérica após variações no módulo de elasticidade e/ou na massa específica (A – 5% no MOE <sub>d</sub> ; B – 10% no MOE <sub>d</sub> ; C – 5% na massa específica; D – 10% na massa específica; E – 5% no MOE <sub>d</sub> e na massa específica; F – 10% no MOE <sub>d</sub> e na massa específica).....	84
Figura 4.5: Alterações nas frequências dos modos de vibração 9° a 13°, apresentadas na simulação numérica após variações no módulo de elasticidade e/ou na massa específica (A – 5% no MOE <sub>d</sub> ; B – 10% no MOE <sub>d</sub> ; C – 5% na massa específica; D – 10% na massa	

específica; E – 5% no $MOE_d$ e na massa específica; F – 10% no $MOE_d$ e na massa específica. ....	85
Figura 4.6: Conjuntos de frequências apresentadas pelo modelo numérico após variações nas propriedades dos materiais .....	86
Figura 4.7: Frequência fundamental extraída do teste de vibração em amostra da peça 01 do freijó .....	88
Figura 4.8: Distribuição do módulo elástico dos corpos de prova extraídos das peças 01, 02 e 03 do freijó.....	89
Figura 4.9: Distribuição da massa específica dos corpos de prova extraídos das peças 01, 02 e 03 do freijó.....	90
Figura 4.10: Frequência relativa dos corpos de prova em intervalos de classe do módulo elástico dinâmico .....	91
Figura 4.11: $MOE_d$ x massa específica (Peça 01) .....	91
Figura 4.12: $MOE_d$ x massa específica (Peça 02) .....	92
Figura 4.13: $MOE_d$ x massa específica (Peça 03) .....	92
Figura 4.14: Distribuição do módulo elástico dos corpos de prova extraídos das peças 01, 02 e 03 do cedro rosa.....	95
Figura 4.15: Distribuição da massa específica para os corpos de prova extraídos das peças 01, 02 e 03 do cedro rosa.....	95
Figura 4.16: Frequência relativa dos corpos de prova em intervalos de classe de módulo de elasticidade .....	96
Figura 4.17: $MOE_d$ x massa específica (Peça 01) .....	96
Figura 4.18: $MOE_d$ x massa específica (Peça 02) .....	97
Figura 4.19: $MOE_d$ x massa específica (Peça 03) .....	97
Figura 4.20: Distribuição do $MOE_d$ e da massa específica para as amostras extraídas da maçaranduba e da muiracatiara .....	99
Figura 4.21: $MOE_d$ x massa específica (maçaranduba).....	100
Figura 4.22: $MOE_d$ x massa específica (muiracatiara).....	100
Figura 4.23: A – grã direita com pequena inclinação visualizada no freijó; B – grã inclinada observada no cedro rosa.....	102
Figura 4.24: A – grã revessa na muiracatiara; B - grã direita na maçaranduba.....	102

Figura 4.25: Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima (A e B - 50x de aumento; C e D - 200x de aumento).....	103
Figura 4.26: Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima (E e F – 500x de aumento).....	104
Figura 4.27: Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima em amostras de cedro rosa (A e B - 50x de aumento; C e D - 200x de aumento; E e F – 500x de aumento).....	105
Figura 4.28: Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima em amostras de maçaranduba (A e B - 50x de aumento; C e D - 200x de aumento; E e F – 500x de aumento).....	107
Figura 4.29: Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima em amostras de muiracatiara (A e B - 50x de aumento; C e D - 200x de aumento; E e F – 500x de aumento).....	109
Figura 4.30: Distribuição dos diâmetros médios das fibras.....	110
Figura 4.31: Distribuição dos diâmetros médios dos poros.....	111
Figura 4.32: Distribuição da frequência de poros/mm <sup>2</sup> .....	111
Figura 4.33: Análise de dispersão e ajustes de curva entre o MOE <sub>d</sub> e os parâmetros anatômicos examinados para a peça 02 do freijó. ....	114
Figura 4.34: Análise de dispersão e ajustes de curva entre o MOE <sub>d</sub> e os parâmetros anatômicos examinados para a peça 03 do cedro rosa. ....	114
Figura 4.35: Análise de dispersão e ajustes de curva entre o MOE <sub>d</sub> e os parâmetros anatômicos examinados para a maçaranduba. ....	115
Figura 4.36: Análise de dispersão e ajustes de curva entre o MOE <sub>d</sub> e os parâmetros anatômicos examinados para a muiracatiara .....	115
Figura 4.37: Madeiras usadas no modelo numérico para cada hipótese assumida.....	116
Figura 4.38: Conjuntos de frequências naturais dos modelos simulados.....	118

Tabela 2.1: Relação de fabricantes e madeiras usadas em instrumentos musicais.....	65
Tabela 3.1: Propriedades das espécies de madeiras tradicionais aplicadas ao modelo numérico .....	72
Tabela 3.2: Propriedades das espécies de madeiras amazônicas aplicadas ao modelo numérico .....	78
Tabela 4.1: Propriedades do freijó.....	89
Tabela 4.2: Propriedades do cedro .....	94
Tabela 4.3: Propriedades das espécies maçaranduba e muiracatiara.....	98
Tabela 4.4: Médias, desvios padrão, coeficientes de variação, mínimos e máximos para os elementos celulares do freijó .....	104
Tabela 4.5: Médias, desvios padrão, coeficientes de variação, mínimos e máximos para os elementos celulares do cedro rosa .....	106
Tabela 4.6: Médias, desvios padrão, coeficientes de variação, mínimos e máximos para os elementos celulares da maçaranduba.....	108
Tabela 4.7: Médias, desvios padrão, coeficientes de variação, mínimos e máximos para os elementos celulares da muiracatiara .....	110
Tabela 4.8: Resultados da análise de regressão multivariada determinando $MOE_d$ como variável dependente e os parâmetros anatômicos como variáveis independentes (freijó)	113
Tabela 4.9: Conjuntos de frequências naturais (em Hz) dos ..... modelos analisados (F – frequência, FP – fator de participação normalizado, ME – massa efetiva normalizada) .....	117
Tabela A.1: Frequências naturais do violão em três etapas de construção. Método: Técnica de excitação por impulso .....	124
Tabela B.1: Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 5% no valor do módulo elástico.....	125
Tabela B.2: Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 10% no valor do módulo elástico.....	125
Tabela B.3: Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após acréscimo de 5% no valor da massa específica. ....	126
Tabela B.4: Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 10% no valor da massa específica .....	126

Tabela B.5: Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 5% no valor do módulo de elasticidade e da massa específica.....	127
Tabela B.6: Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 10% no valor da massa específica e do módulo elástico. ....	127
Tabela C.1: Massa específica e MOE <sub>d</sub> calculados para corpos de prova de Freijó.....	128
Tabela C.2: massa específica e MOE <sub>d</sub> calculados para corpos de prova de cedro rosa. ...	128
Tabela C.3: Massa específica e MOE <sub>d</sub> calculados para corpos de prova de maçaranduba e muiracatiara. ....	129
Tabela D.1: Resultados de mensuração e contagem de elementos celulares do freijó.....	130
Tabela D.2: Resultados de mensuração e contagem de elementos celulares do cedro rosa .....	131
Tabela D.3: Resultados de mensuração e contagem de elementos celulares da maçaranduba .....	132
Tabela D.4: Resultados de mensuração e contagem de elementos celulares da muiracatiara .....	132
Tabela E.1: Resultados da análise de regressão multivariada determinando MOE <sub>d</sub> como variável dependente e os parâmetros anatômicos como variáveis independentes (cedro rosa). ....	134
Tabela E.2: Resultados da análise de regressão multivariada determinando MOE <sub>d</sub> como variável dependente e os parâmetros anatômicos como variáveis independentes (maçaranduba) .....	134
Tabela E.3: Resultados da análise de regressão multivariada determinando MOE <sub>d</sub> como variável dependente e os parâmetros anatômicos como variáveis independentes (muiracatiara).....	135

## 1 – INTRODUÇÃO

A rica biodiversidade das florestas brasileiras tem levado a reflexões sobre sua melhor utilização objetivando o desenvolvimento sustentável dos povos que dependem delas para o seu sustento e, ainda, o desenvolvimento econômico do país como um todo (Homma 2013, Clement e Higuchi 2006, Fraxe et al. 2007, Silva 2017). Os benefícios gerados a partir do uso consciente da floresta são muitos e, dentre eles, o aumento na disponibilidade de empregos no campo, nas áreas de floresta e nos centros urbanos, a preservação destes empregos, uma vez que a floresta não será degradada, e a atenuação no volume de poluentes liberados, quando se considera a substituição de produtos que geram resíduos agressivos por madeira. Considerando o uso consciente da floresta, a busca por novas espécies para a substituição de espécies já extraídas em demasia faz parte dos novos modelos de exploração que visam exatamente disponibilizar empregos e matéria prima mantendo a floresta e interrompendo os processos de extinção. A intensa exploração nacional e internacional de um pequeno número de espécies muito apreciadas por suas propriedades levou à sua total ou quase total extinção; somando-se a isso o aparente desinteresse em se empregar práticas de promoção do retorno dessas espécies às florestas nacionais.

Na produção de instrumentos musicais, especialmente de violões clássicos, o tradicionalismo na escolha de madeiras é forte e é justificado pelas excelentes propriedades acústicas das espécies empregadas durante séculos. No entanto, a escassez da matéria prima tradicional que, em sua maior parte, é importada, tem despertado o interesse de alguns produtores, sejam eles amadores ou profissionais, por novas espécies que possuam propriedades semelhantes (Sproßmann et al. 2017, Flores 2015). Este interesse é maior na



linha industrial que visa, entre outras coisas, disponibilizar produtos mais acessíveis, porém, de qualidade, diminuindo custos. Nesta linha, também se verifica, atualmente, a aplicação de materiais não madeireiros, como fibra de vidro ou fibra de carbono e grafite, a componentes de violões (Roast 2016, Saccaggi et al. 2017, Nicholas et al. 2017) ou mesmo ao instrumento inteiro. Modelos assim construídos já são encontrados no mercado, como os violões RainSong, que, além de disponibilizar interessante resposta acústica, não apresentam alterações decorrentes da umidade ambiente. Relativamente à madeira, as espécies Teca e Araucária são exemplos de nova aplicação em tambores de bateria, assim como o Freijó, que tem sido usado na produção do corpo de guitarras elétricas. O marupá também vem sendo empregado na construção de tampos de violão.

Os avanços nas pesquisas sobre o violão não se limitam aos materiais de composição. A complexidade envolvida na produção sonora do instrumento tem despertado o interesse de pesquisadores e instrumentistas sobre todos os seus aspectos construtivos, desde a composição geral até as peculiaridades de cada um de seus elementos (Elejabarrieta et al. 2002, French 2008, Stanciu et al. 2008, Lee et al. 2016). Em uma abordagem analítica, modelos matemáticos têm sido aplicados fornecendo resultados relativos aos dois ou três primeiros modos e frequências naturais, como se verifica em French 2007, Popp 2012, Richardson et al. 2012, etc. Estes modos são aceitos como os mais representativos no comportamento oscilatório do violão e responsáveis pela maior parte da resposta sonora (French 2007). Análises experimentais e numéricas também têm fornecido importante avanço permitindo a investigação de uma gama muito grande de frequências que podem ser importantes na resposta acústica.

De modo geral, os estudos objetivam responder a questões de interesse de produtores e instrumentistas, e a principal questão levantada diz respeito à qualidade do

instrumento. Esta não é uma questão de resposta simples porque há fatores subjetivos envolvidos na análise, mas alguns pressupostos básicos têm sido determinados para que se possam buscar resultados objetivos e aplicáveis. Considera-se, em princípio, que violões de qualidade são capazes de produzir elevado nível de pressão sonora com o timbre adequado. Neste sentido, o tampo é reconhecido como o principal componente na produção de som por receber de forma direta a energia da corda vibrante, e é projetado de maneira que possa suportar bem as tensões das cordas sendo, ao mesmo tempo, capaz de gerar bom volume sonoro (Saccaggi et al. 2017, Richardson et al. e Siminoff (apud Lee et al. 2016)). A capacidade de exercer essas e outras funções está, em parte, relacionada às características do leque harmônico, que recebe a denominação “alma” entre luthiers e se trata de um conjunto de pequenas varetas adequadamente preparadas, dispostas e coladas na face interior da placa de madeira que forma o tampo (Zaczéski et al. 2017). Segundo French e Lewis (1995), o tampo é geralmente projetado para ter um número de frequências naturais dentro do intervalo de frequências naturais das cordas, mas alterações no leque harmônico têm sido inseridas com objetivo de se alcançar respostas acústicas e rigidezes determinadas. Assim, para estilos musicais específicos pode-se encontrar diferentes padrões de leque harmônico e, neste sentido, um violão considerado de qualidade para estilos musicais como mpb, bossa nova e música clássica não é o mesmo preferido em exibições de rock, pop e derivados, por exemplo. Outros parâmetros que determinam a qualidade de um violão são aqueles relacionados à resistência mecânica e à estabilidade dimensional; estes são dependentes também do material usado na confecção do instrumento (Borland et al. 2014). Baixas resistência e estabilidade podem levar ao colapso do sistema e a alterações indesejadas na resposta; daí a necessidade da escolha adequada dos materiais a compor cada parte do instrumento e o exame cuidadoso de suas propriedades.

Diante disso, tendo em vista a correta e adequada aplicação da madeira, faz-se necessária a adoção de procedimentos que levem ao conhecimento amplo de suas propriedades, o que se verifica para qualquer material de engenharia (Sproßmann 2017). É indispensável que essas propriedades sejam conhecidas a fim de que as perdas e desperdícios no processo de produção sejam as mínimas e que o produto final esteja conforme as necessidades e desejos do consumidor. Neste contexto, a fim de se verificar a aplicabilidade de madeiras amazônicas na construção de instrumentos musicais de corda e de sopro, Slooten e Souza (1993) e Teles (2005) estudaram espécies amazônicas e selecionaram aquelas que, por terem propriedades semelhantes às de espécies tradicionais, como spruce e ébano, poderiam ser usadas na confecção desses instrumentos. Os autores examinaram características gerais (cor, textura, figura e grã), propriedades físicas (massa específica e contração), propriedades mecânicas (flexão estática e compressão paralela à grã, estabilidade dimensional), propriedades acústicas e características relacionadas a usinagem. Três violões foram confeccionados utilizando-se madeiras pré-selecionadas, de acordo com o componente do instrumento, e foram avaliados por músicos profissionais nos quesitos intensidade, equilíbrio sonoro, deterioração, sensibilidade, ressonâncias indesejáveis, peso e brilho; dois deles foram considerados bons instrumentos. Entre as madeiras aplicadas nestes protótipos estão o freijó, a muiracatiara e o marupá.

Ainda em direção a madeiras amazônicas, Portela (2014) comparou um tampo de violão feito de marupá (*Simarouba amara*) a outros tampos idênticos feitos com madeira tradicional e mostrou que a espécie brasileira tem um grande potencial na construção de instrumentos de qualidade. Uma análise numérico-experimental baseada na simulação de elementos finitos e em testes experimentais foi realizada enfatizando os critérios de qualidade de um tampo real desenvolvido em uma oficina-escola de lutheria. Em uma

visão mais generalizada, Flores (2015) estudou algumas espécies florestais brasileiras para a produção de guitarras elétricas de boa qualidade. O autor comparou as propriedades do marupá, jenipapo (*Genipa americana*), andiroba (*Carapa guianensis*) e araucária (*Araucaria angustifolia*) com propriedades de espécies tradicionais. Realizaram-se medições da velocidade de propagação de onda e testes de excitação por impulso por meio do qual se calculou módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, impedância sonora, coeficiente de radiação sonora e amortecimento; o teor de umidade e a densidade também foram examinados. Os resultados de uma análise numérica modal foram comparados com os resultados experimentais e o autor observou similaridades entre o marupá e a andiroba e as espécies tradicionais. Soares (2014), ao analisar a viabilidade da teca (*Tectona grandis*) na construção de um violão clássico, estudou a madeira utilizando tábuas de cerca de 18 anos, provenientes de áreas reflorestadas. As placas foram processadas para fazer todas as partes do violão. Testes não destrutivos foram aplicados para determinar a frequência natural de vibração da madeira e o instrumento construído foi apresentado a músicos profissionais e amadores, que deram opinião sobre sua sonoridade. O instrumento foi aprovado por unanimidade, mas em questões construtivas, apresentou problemas no ajuste da altura dos trastes; também apresentou peso elevado e braço robusto. Costa (2017) definiu uma gama de variações de parâmetros tecnológicos que permitiriam classificar espécies madeireiras da Amazônia para a composição de instrumentos musicais de corda. A caracterização dos elementos do xilema e da densidade aparente foi conduzida e a técnica de excitação por impulso foi aplicada para se obter módulo de elasticidade, velocidade de som, impedância de som, coeficiente de radiação e amortecimento. A partir de um levantamento das espécies mais comercializadas em Cruzeiro do Sul-AC, quatro delas foram selecionadas e caracterizadas de forma semelhante às tradicionais. Densidade,

retratibilidade e coeficiente de anisotropia foram avaliados. A autora concluiu que as espécies caroba (*Jacaranda copaia*) e marupá podem ser utilizadas na construção do tampo de instrumentos de corda, muirapiranga (*Brosimum rubescens*), tauari (*Cariniana decandra*) e cedro (*Cedrela odorata*) para fundo e laterais.

As propriedades acústicas, altamente relacionadas às propriedades elásticas e à massa específica da madeira, são de grande interesse na produção de instrumentos musicais, uma vez que ditam como o instrumento responde ao estímulo aplicado nas cordas, e definem o seu timbre. As propriedades elásticas são bem conhecidas e têm sido investigadas vastamente, no entanto, pela análise dos resultados apresentados em pesquisas sobre madeira nos diversos setores de aplicação, verifica-se que estas podem variar consideravelmente, o que tem por consequência alterações nas propriedades acústicas. Neste sentido, o estudo da variabilidade nas propriedades da madeira e o efeito desta variabilidade na resposta vibroacústica de violões se mostra necessário para o setor em questão.

Nesta tese, buscou-se, de forma geral, analisar os efeitos da variabilidade de propriedades mecânicas na resposta acústica de um violão clássico e, com este objetivo, procedimentos para estudos experimentais, numéricos e anatômicos foram realizados relativamente à madeira e/ou ao violão. Com a adoção do modelo numérico apresentado por Ribeiro (2014) para a previsão da resposta acústica sob aplicação de propriedades das madeiras amazônicas examinadas na presente pesquisa, mostrou-se necessário executar análises experimentais em duas novas etapas de construção do instrumento: caixa de ressonância e braço, e conjunto caixa de ressonância/braço/ponte. Verificou-se, com este procedimento, que a anexação do braço não inseriu alterações consideráveis nos valores das frequências, mas a ponte, por outro lado, produziu relevante alteração no segundo pico

de frequência, o mais influente na vibração do tampo; resultado alinhado aos apresentados por Torres e Boullosa (2009). O primeiro pico, referente ao primeiro modo de vibração, originado pelo modo  $A_0$  de Helmholtz (Elejabarrieta et al. 2002) se manteve na frequência de 103 Hz, enquanto que o segundo sofreu um decréscimo de 20 Hz; os demais picos foram consideravelmente inibidos, o que, a princípio, parece conferir à ponte certa característica filtrante de frequências médias e altas. Estes resultados permitiram inferir sobre as possíveis perdas ao se adotar o modelo da caixa isolada nas simulações (diante da resposta do violão completo), modelo este projetado com as dimensões da caixa construída pelo luthier Antônio Maurício Barros e validado a partir de resultados de análise modal experimental. Ribeiro et al. (2013), via análise numérica, examinaram o efeito do leque harmônico usado por Barros na resposta do tampo comparando-a com a resposta do tampo tradicional atribuído ao luthier Antonio de Torres Jurado (1817-1892), e verificou-se que o uso do leque não tradicional, nomeado “espinha de peixe”, culminou em elevação nos valores de parte do conjunto de frequências, o que indica elevação na rigidez do tampo e, por consequência, na rigidez da caixa acústica. A sensibilidade da resposta do modelo numérico da caixa acústica assim construída, diante de variações nos parâmetros mecânicos da madeira, também foi avaliada, o que permitiu prever o comportamento da resposta diante da variabilidade nas propriedades consideradas.

Além destes procedimentos, a caracterização de quatro espécies amazônicas (maçaranduba, freijó, cedro rosa, muiracatiara), adquiridas no mercado regional dos estados de S. Paulo e Rio de Janeiro, foi realizada quanto à massa específica e ao módulo de elasticidade dinâmico (propriedades requisitadas em análises modais numéricas), obtido a partir da técnica de excitação por impulso, a fim de se aplicar tais valores ao modelo numérico adotado no trabalho. Tais propriedades foram avaliadas a partir de corpos de

prova devidamente dimensionados segundo a norma ASTM E1876 (2015) e a variabilidade nos resultados foi analisada. Em adição, procedeu-se ao exame de características anatômicas das espécies, a partir de amostras recortadas dos corpos de prova, e possíveis relações entre estas e as propriedades mecânicas calculadas anteriormente foram avaliadas. Por fim, os valores obtidos na caracterização mecânica foram aplicados ao modelo numérico e os parâmetros modais obtidos em cada situação foram comparados ao resultado padrão, no qual os valores de madeiras tradicionais foram utilizados. Duas hipóteses de aplicação das madeiras amazônicas foram propostas: na primeira, considerou-se o uso do freijó na placa do tampo harmônico e o cedro rosa nas travessas e reforços e, na segunda, adicionalmente à hipótese anterior, a maçaranduba foi aplicada ao fundo. No texto, são apresentados os resultados alcançados em cada hipótese.

## **1.1 – Objetivos**

O objetivo geral do trabalho pode ser definido em obter a resposta tímbrica da caixa acústica de um violão clássico via método de elementos finitos, utilizando propriedades de madeiras amazônicas adquiridas no mercado regional dos estados de S. Paulo e Rio de Janeiro, avaliando-a por meio de comparação com a resposta da caixa composta por madeiras tradicionais.

Para se alcançar este objetivo, os seguintes procedimentos foram executados:

- Análise modal experimental dos sistemas acústicos caixa/braço e caixa/braço/ponte.
- Estudo da sensibilidade do modelo numérico da caixa acústica.
- Caracterização de quatro espécies amazônicas quanto à massa específica e ao módulo de elasticidade dinâmico.

- Análise anatômica;
- Relação propriedades mecânicas/características anatômicas;
- Aplicação de propriedades mecânicas das madeiras amazônicas analisadas a elementos da caixa acústica modelada.
- Comparação de resultados alcançados com aplicação das madeiras amazônicas com a resposta do modelo com espécies tradicionais.

## **2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 – A madeira**

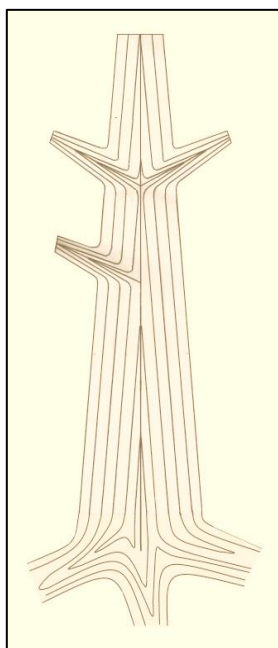
No enorme grupo vegetal do planeta (Reino Plantae), nem todas as árvores têm madeira. A madeira é um tecido que compõe uma região interior de certas espécies arbóreas e possui características e funções específicas que determinam o seu tradicional uso na história humana. As espécies que produzem madeira (ou *lenho*, ou ainda, *xilema secundário*) são denominadas espécies madeireiras (ou plantas lenhosas) e são diferenciadas como plantas vasculares dotadas de um caule perene localizado acima da superfície do solo. De modo geral, dentro da classificação taxonômica, podem-se encontrar quatro divisões gerais para as plantas terrestres: briófitas (Bryophyta), pteridófitas (Pteridophyta), gimnospermas (pinophyta) e angiospermas (magnoliophyta). Dentro destes quatro grupos, espécies madeireiras podem ser encontradas em apenas dois: gimnospermas e angiospermas. A divisão gimnosperma possui quatro classes - Pinophyta (coníferas), Cycadophyta (cicadáceas); Ginkgophyta (ginkgo); Gnetophyta (gnetófitas) - dentre as quais, apenas as coníferas são conhecidas como produtoras de madeira. Até passado recente, as angiospermas (classe da qual faz parte a maioria das árvores frutíferas) eram



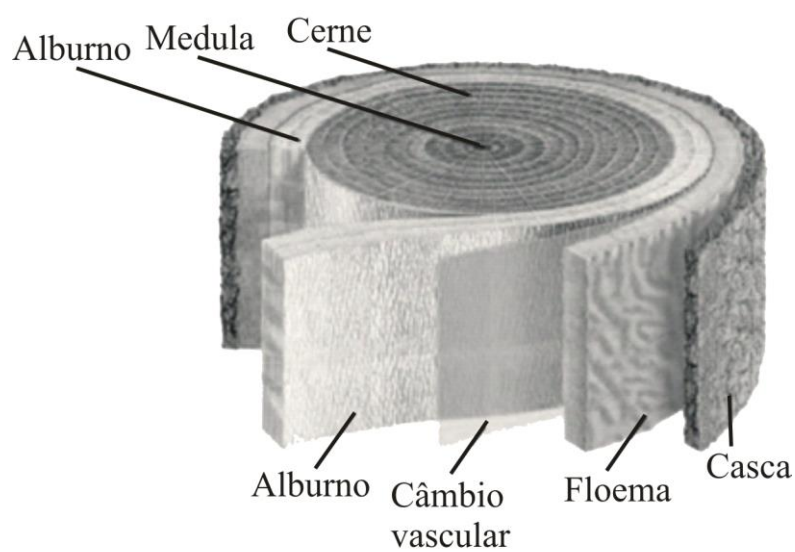
divididas nas classes monocotiledônea e dicotiledônea (Shmulsky e Jones 2019; Santos e Ho 2014). Com base nesses termos, as espécies produtoras de madeira eram enquadradas no grupo das dicotiledôneas, apesar de nem toda dicotiledônea ser produtora de madeira. Alterações nessa nomenclatura foram inseridas com base em análise genética, por exemplo, passando a diferenciar espécies dentro da segunda classe com as designações eudicotiledônea e dicotiledônea basal. Apesar disso, nas áreas envolvidas com a aplicação prática da madeira, o termo *folhosa* é utilizado largamente para designar as angiospermas produtoras de madeira, e este será o termo adotado neste trabalho.

### **2.1.1 – Plantas produtoras de madeira**

As plantas produtoras de madeira são árvores dotadas de uma copa com galhos e folhas, um tronco ou caule robusto, que faz a sustentação da planta, e as raízes, que fixam a árvore no solo e exercem papel fundamental no processo de alimentação da planta. A madeira pode ser encontrada nos galhos, no tronco e nas raízes da árvore (Fig. 2.1), no entanto, para a maioria dos usos com fim comercial, a madeira do tronco é requerida por apresentar qualidade e dimensões adequadas às mais diversas aplicações. O corte transversal do tronco de uma planta produtora de madeira evidencia, geralmente, os diferentes tecidos que o compõem, sendo estes designados visualmente (macro e microscopicamente) e pelas funções que executam na planta. A figura 2.2 exemplifica o corte transversal de um caule (tronco da árvore) de uma espécie produtora de madeira e exhibe os tecidos que o compõem.



**Figura 2.1:** Formação de madeira no tronco, na raiz e nos galhos. Adaptado de Burger e Richter (1991) e Vergani et al. (2017)

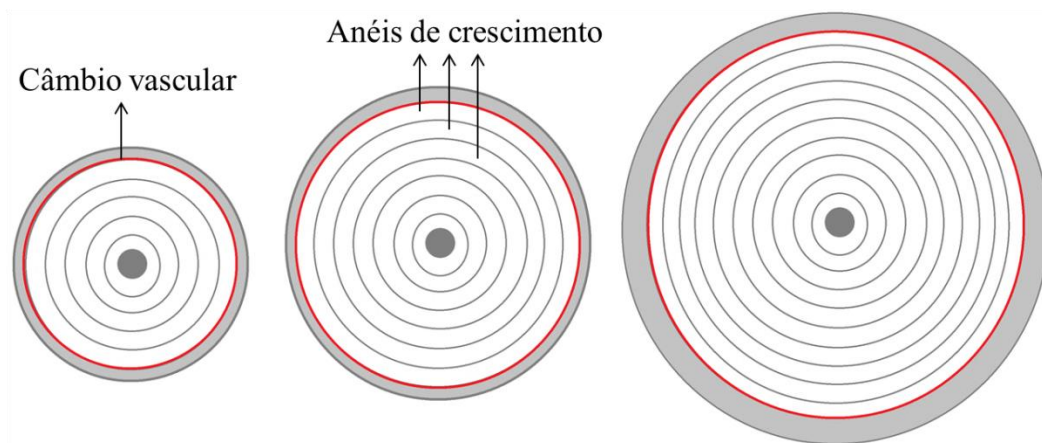


**Figura 2.2:** Corte transversal de um caule contendo os elementos internos de uma espécie produtora de madeira. Adaptado de Burger e Richter (1991)

No desenvolvimento de uma planta, se observam dois padrões de crescimento: O crescimento primário (aumento em altura) e o crescimento secundário (em espessura)

(Klock et al. 2005), sendo que a madeira é formada apenas no crescimento secundário. A medula é um dos primeiros tecidos a serem formados após a germinação, é a primeira região produzida no processo de geração do caule; normalmente, compõe a região central do tronco, sendo constituída por células que armazenam substâncias nutritivas, as células parenquimáticas, também consideradas células de preenchimento. Nas plantas novas, a medula também participa da alimentação da planta na condução ascendente de líquidos. Não se considera que ela faça parte da madeira e, de modo geral, não é comercializada por apresentar estrutura frágil, com células de parede fina, pouca resistência mecânica e pouca resistência ao ataque de organismos *degradadores de madeira*.

Com a maturação da planta, desenvolve-se uma estrutura cilíndrica formada por células meristemáticas (capazes de se reproduzir), invisível a olho nu, tendo a medula como eixo. Esta estrutura é o Câmbio Vascular ou Cambium, responsável pelo crescimento em espessura da árvore. De acordo com Larson (1994, apud Prislán et al., 2013, p. 393), em uma linha radial que secciona o câmbio, se verifica uma célula inicial que permanece no meristema e as células-mães do floema e do xilema, que são produzidas pela divisão das iniciais. O câmbio produz quase ininterruptamente novas células em direção à medula e em direção à casca (divisão periclinal). O tecido formado pelas células geradas pelo Câmbio vascular em direção à medula é chamado xilema secundário ou madeira ou ainda lenho, e o tecido formado em direção à casca é designado floema. Como o número de células direcionadas para o interior, formando madeira, é consideravelmente superior à quantidade produzida para fora, o volume de madeira em uma planta lenhosa se apresenta muito maior que o volume de floema no espécime, e o câmbio é mantido sempre nas extremidades da árvore, entre o lenho e a casca (Fig. 2.3). As células iniciais também podem sofrer divisões do tipo anticlinal, o que permite o aumento em circunferência do câmbio.



**Figura 2.3:** Formação de madeira no tronco

De forma geral, essa produção celular promovida pelo câmbio, apesar de ininterrupta, não tem comportamento constante. No período anual vegetativo (normalmente, primavera), a taxa de produção celular é maior e as células produzidas acabam por apresentar paredes mais finas e lumes grandes. Com a aproximação do fim do período vegetativo (período outonal ou estival), o câmbio diminui sua atividade fisiológica passando a produzir células com paredes mais espessas e lumes menores. Normalmente, a região formada no período vegetativo possui coloração mais clara e é denominada *lenho inicial*, enquanto que, no segundo caso, a região se apresenta mais escura e é denominada *lenho tardio* (Ballarin e Nogueira, 2005). O desenvolvimento dessas duas regiões, anualmente, leva à formação de desenhos circulares concêntricos no cerne (visualizados na superfície de um corte transversal do tronco) e a coroa circular gerada é nomeada anel de crescimento (Fig. 2.3). A idade de uma árvore é, geralmente, calculada a partir do número de anéis de crescimento apresentado pelo espécime. Normalmente, estes anéis são distintos, mas, em alguns casos, a distinção não pode ser vista a olho nu. Árvores de regiões onde as estações do ano são bem definidas apresentam anéis nítidos e aquelas que crescem em locais de condições climáticas sem muitas variações teriam anéis indistintos. Ainda, para

algumas espécies tropicais os anéis corresponderiam a períodos de chuva e períodos de seca, podendo apresentar dois ou mais ciclos por ano, e este comportamento geraria anéis de crescimento não necessariamente anuais (Ballarin e Nogueira, 2005). A região formada pelas primeiras camadas de células geradas pelo câmbio, abrangendo aproximadamente de 10 a 12 anéis (Klock et al. 2005), acaba por apresentar características de baixa resistência ao ataque de pragas como cupins, formigas e fungos, e baixa resistência mecânica; durante os processos de secagem, contrai mais que o restante do lenho, contribuindo para empenamentos. Apesar de ser, por vezes, considerada parte do lenho, se trata de uma região de transição entre a medula e o lenho e recebe a denominação lenho juvenil.

A casca da árvore é formada por duas regiões, uma morta denominada *periderme* ou *ritidoma* (composta por células mortas), responsável pela proteção contra os agentes externos, proteção térmica e manutenção da umidade no espécime, e uma viva, denominada floema, responsável pelo transporte da seiva das regiões superiores até as regiões inferiores da planta. O tipo de tecido que compõe estes elementos não lhes dá propriedades estruturais, contudo, há inúmeros exemplos de aplicação milenar na produção de medicamentos, temperos e vários produtos de uso industrial e doméstico. O sobreiro é um exemplo; seu ritidoma tem um desenvolvimento tão grande que permite a retirada de lâminas espessas (cortiça) que apresentam ótimas propriedades termoacústicas, sendo empregadas em processos de isolamento. O cerne e o alburno são as duas regiões que, de forma efetiva, compõem a madeira. Eles são formados por células que, unidas, executam funções vitais na planta como condução da seiva (verticalmente, da raiz ao topo) e de nutrientes, reserva de substâncias e sustentação do vegetal. Essas duas regiões formam a madeira e, na maioria dos indivíduos arbóreos, podem ser diferenciadas pela cor, sendo o

cerne de coloração mais escura e o alburno de coloração mais clara; há casos em que as diferenças colorimétricas não podem ser detectadas a olho nu.

### **2.1.2 - Cerne e alburno**

A região da madeira classificada como alburno é formada pelas células novas produzidas pelo câmbio. Sob determinadas transformações, parte das células produzidas passam a realizar atividades de transporte de seiva e de nutrientes. Juntamente com o floema, ele forma o sistema vascular do espécime. Com o passar do tempo, dentro das células responsáveis pela condução de seiva (os elementos de vaso), começam a ocorrer aglomerações de compósitos e encorpadura de líquidos que resultam na interrupção das vias de condução. Além disso, segundo Carmo (2008), vasos podem ser obstruídos por intrusão de tiloses, formadas por células parenquimáticas adjacentes. Nas células responsáveis pelo armazenamento de nutrientes (células parenquimáticas), ocorre deposição de substâncias resultantes da transformação dos materiais de reserva (Burger e Richter, 1991) e, nas paredes das células de sustentação (fibras ou traqueídes), também se visualizam alterações com deposição de lignina na parede celular. Todo este processo termina por gerar um tecido mais denso, mais higroscopicamente estável que o alburno, com células mais resistentes a agentes degradadores, e mais resistente mecanicamente. Este tecido é o cerne (Fig. 2.4). A aglomeração dessas substâncias lhe confere, geralmente, coloração diferente do alburno, mas é possível encontrar madeiras com coloração indistinta.



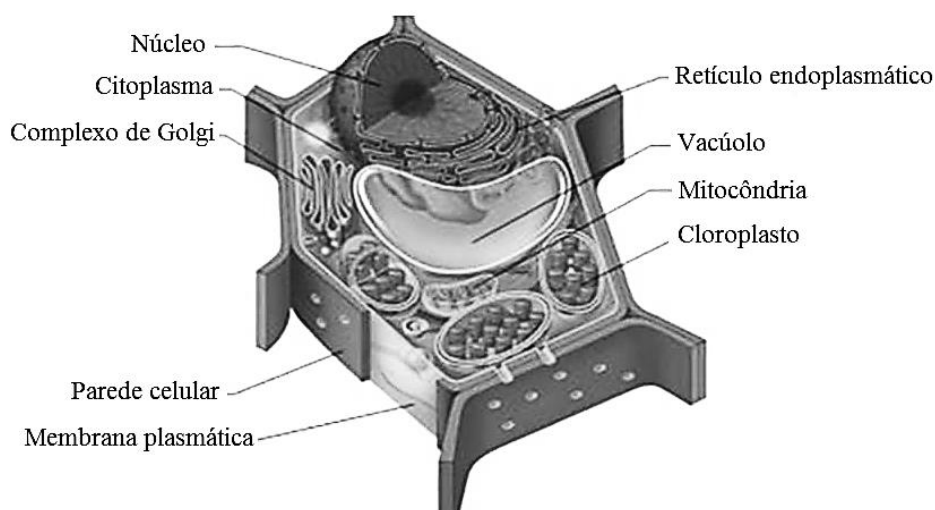
**Figura 2.4:** Cerne e alburno (Fonte: <https://www.anpm.org.br/conheca-caracteristicas-da-madeira/>)

As diferenças gerais entre estes tecidos direcionam a aplicação da madeira, e indicam que o uso do cerne é preferencial quando se objetiva a fabricação de artigos mais duráveis e resistentes. Não obstante, produtos capazes de proteger a madeira e diminuir sua higroscopicidade têm sido desenvolvidos e utilizados no sentido de diminuir a instabilidade dimensional também do alburno tornando-o aplicável a um número maior de situações (Carmo 2008; Amaral et al. 2014).

### **2.1.3 - As células da madeira**

Os elementos celulares de um indivíduo arbóreo são produzidos e distribuídos de modo a formar tecidos especializados na alimentação, na reprodução, no crescimento (vertical e horizontal), na proteção e na sustentação do espécime. No que tange a produção das células que compõem a madeira, quatro tipos celulares são formados: as células de parênquima, as traqueídes, as fibras e os elementos de vaso. As células vegetais recém-

produzidas pelo câmbio apresentam, geralmente, núcleo individualizado (núcleo envolvido pela membrana nuclear), parede celular, membrana plasmática, citoplasma e várias organelas (Fig. 2.5). No entanto, observa-se que essas células vão sofrendo diferenciações de acordo com a função que deverão exercer na planta. As células que fazem parte da madeira são morfologicamente semelhantes na origem, mas passam a adquirir formas especializadas com o crescimento (Shmulsky and Jones 2019). Elas devem formar tecidos capazes de dar resistência à planta ou fazer a condução de seiva (conduzir água e sais minerais) ou reservar nutrientes; assim, cada célula (ou grupos de células) vai apresentar uma atividade fisiológica ou mecânica específica.



**Figura 2.5:** Elementos da célula vegetal.

<http://ead.hemocentro.fmrp.usp.br/joomla/index.php/programa/adote-um-cientista/92-celula-uma-unidade-fisiologica>

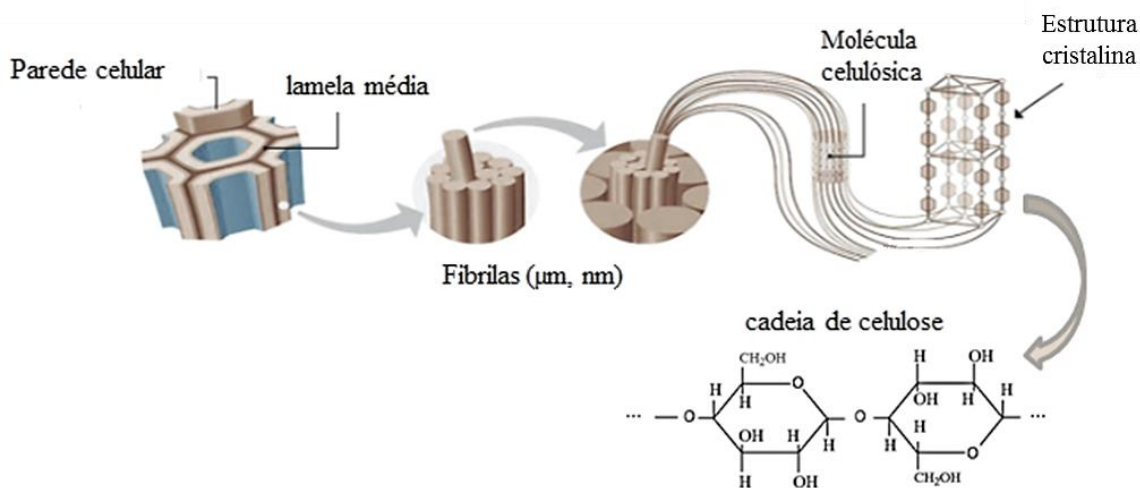
O processo de divisão celular no câmbio vascular se inicia com a multiplicação dos elementos que compõem o interior da célula. Após a formação dos dois núcleos, passa a ocorrer aglomeração de substâncias para a composição de uma estrutura que divide o conteúdo em duas porções similares. A célula filha é, então, gerada. A figura 2.6 exemplifica o processo de divisão da célula vegetal.





**Figura 2.6:** Processo de divisão da célula vegetal

Segundo Burger e Richter (1991), a *lamela média*, composta basicamente de pectato de cálcio e magnésio, é a primeira camada a surgir na formação da estrutura que separa os conteúdos celulares para a geração de uma nova célula, tendo a função de manter as células unidas. Na sequência, microfibrilas de celulose vão se depositando sobre a lamela média formando a camada primária da parede celular, uma trama irregular de microfibrilas, com aparência de rede, dotada de grande elasticidade. As microfibrilas são arranjos bastante precisos de cadeias longas de celulose (Shmulsky and Jones 2019) que, por sua vez, são nomeadas fibrilas. A figura 2.7 traz o esboço dessas estruturas na composição da parede celular.

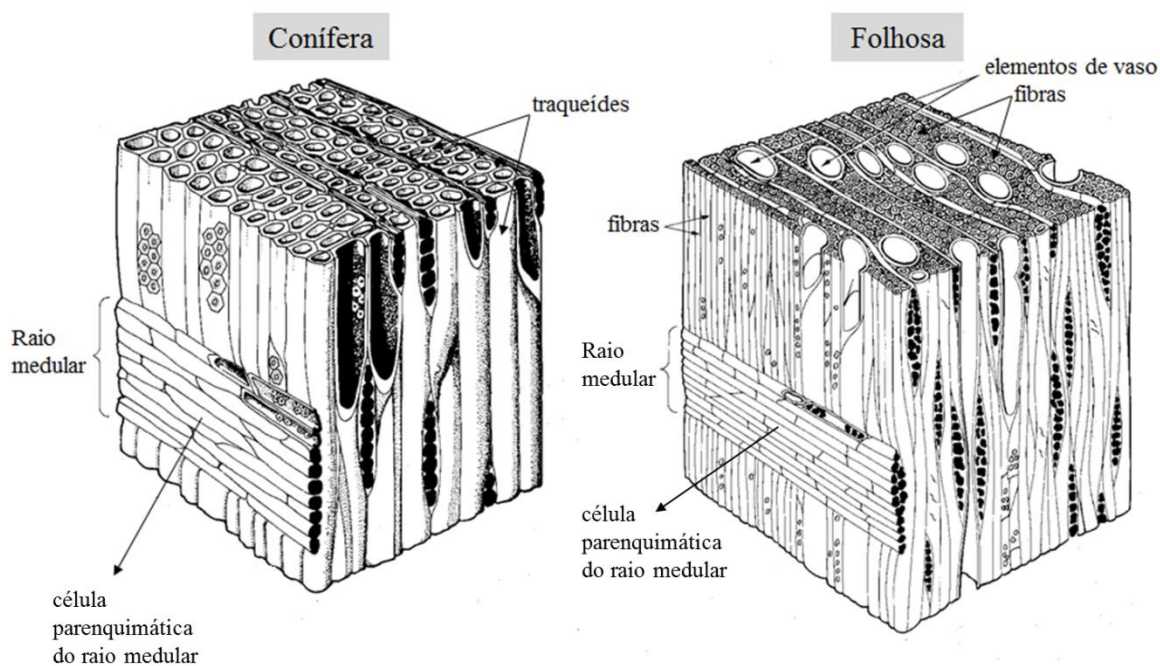


**Figura 2.7:** Estrutura básica da parede celular (adaptado de Kargarzadeh et al. 2017)

A parede da célula recém-gerada é nomeada parede primária porque pode, após a sua formação e à medida que a célula envelhece, receber novas camadas de microfibrilas;

estas novas camadas encorpam a parede celular e lhe conferem maior resistência. Com isso, dependendo da espécie de madeira e da célula em questão, podem-se observar também as paredes secundária e terciária. Klock et al. (2005) informam que a transição da lamela média para a primeira camada da parede celular não é muito clara sendo, por vezes, encontrado o termo lamela média composta para definir o conjunto. A estrutura da parede primária, sendo mantida em quase todos os tipos de células e espécies, é muito elástica, o que dá a ela a capacidade de se expandir durante o crescimento da célula até seu tamanho definitivo.

A variedade morfológica das células que compõem a madeira tem origem ainda no câmbio que, sendo constituído por dois tipos celulares, é capaz de produzir dois padrões de elementos: as células iniciais fusiformes originam os elementos celulares axiais do lenho, e as células iniciais radiais produzem os elementos celulares transversais; as células iniciais fusiformes são verticalmente alongadas e aparentemente achatadas, em corte transversal, e as células iniciais radiais são horizontalmente alongadas ou isodiamétricas. A célula mãe original do câmbio, multiplicando-se segundo tais padrões, se divide em duas células mais estreitas, absolutamente iguais no início. Uma das duas células mantém o seu carácter embrionário e sofre aumento de tamanho de modo a se tornar uma célula-mãe que toma o lugar da original, e a outra célula se diferencia em um elemento constituinte do lenho. Novos processos de diferenciação ocorrem e levam à formação dos elementos de vaso, das fibras e das células parenquimáticas nas folhosas e à formação das traqueídes e de células parenquimáticas nas coníferas (Fig. 2.8). De modo geral, elementos de vaso, fibras, traqueídes e células do parênquima axial, com sua característica fusiforme, constituem o sistema longitudinal, e as células do parênquima radial constituem o sistema radial do lenho.



**Figura 2.8:** Células das madeiras de coníferas e folhosas. (Adaptado de <http://www.buyqldtimber.com.au/news-3/Hardwood-vs-Softwood-Timber.aspx>)

A presença ou não de um ou outro tipo de célula na madeira depende da classe em questão (coníferas ou folhosas) e o percentual celular varia em decorrência da espécie. Segundo Klock et al. (2005), 90 a 95% da massa lenhosa das coníferas é constituída por traqueídes, e 5 a 10% por células de parênquima, enquanto que a massa das folhosas tem uma composição mais heterogênea, apresentando fibras, células de parênquima e elementos de vaso. As fibras podem ocupar de 20 a 80% da massa lenhosa (Burger e Richter, 1991) das folhosas, os vasos, 7 a 55%, e as células de parênquima, formando os parênquimas axial e/ou radial, 30 a 35%. O percentual de cada tipo celular na composição da madeira varia também entre as espécies e as diferencia.

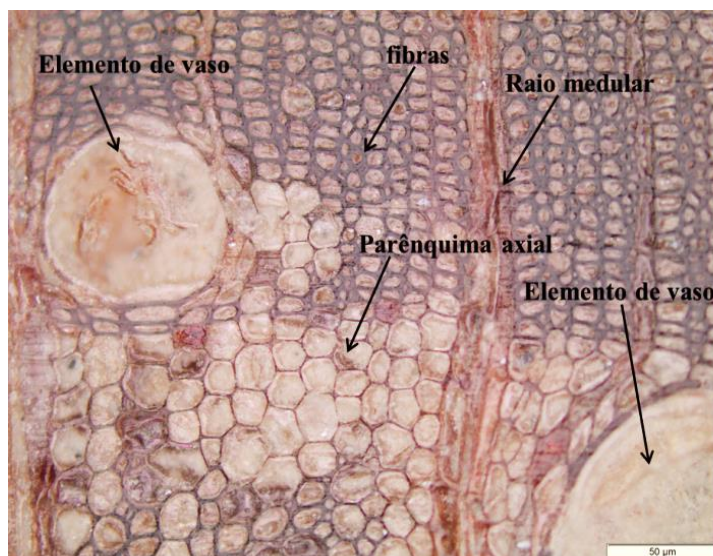
As traqueídes, presentes nas coníferas, são células alongadas cujo comprimento médio varia entre 2 e 5 mm de comprimento, podendo, porém, atingir valores extremos de cerca de 11 mm, como no gênero *Araucária*. As variações no comprimento dependem da

espécie, mas também podem variar de acordo com a idade e a posição da célula no tronco. Elas têm como função conduzir a seiva no alburno, estocar substâncias polimerizadas (no cerne) e conferir resistência mecânica ao tronco. Ainda nos seus primeiros dias, as traqueídes sofrem “morte” celular programada por inclusão de lignina sobre toda a parede celular e dissolução do seu protoplasma; apenas as paredes celulares são mantidas e enrijecidas. Deste modo, o interior da célula fica oco, o que permite o estabelecimento de um fluxo de líquidos no tronco através dos orifícios de intercomunicação, as pontoações. Para que haja a circulação de líquidos extraídos do solo nas regiões periféricas do alburno, as paredes laterais apresentam pontoações areoladas pelas quais o líquido passa de célula a célula. As traqueídes correspondentes ao lenho inicial e ao lenho tardio, regiões que definem cada anel de crescimento, apresentam diferenças morfológicas. No primeiro caso, os lumes são grandes e as paredes finas com numerosas pontoações areoladas, assumindo, preponderantemente, a função de condução. No segundo caso, os lumes são menores e as paredes delgadas com poucas pontoações, e a função principal é de sustentação (Richter e Burger, 1991).

Os elementos de vaso são células especializadas que podem constituir de 7 a 55% da massa lenhosa das folhosas (Klock et al. 2005). Como não são observados nas coníferas, são indicados como principal elemento de diferenciação entre os dois grupos. Sua formação é semelhante à das traqueídes com “morte” celular por inclusão de lignina na parede e perda do protoplasma. Os elementos de vaso são produzidos de modo a ficar dispostos uns sobre os outros se comunicando nas extremidades por meio das placas de perfuração. Com esta disposição, eles formam dutos alongados que, no alburno, conduzem água e nutrientes desde a raiz até a parte superior da planta e, no cerne, servem como depósito de substâncias polimerizadas.

As células parenquimáticas seriam, primordialmente, células de preenchimento, responsáveis por ocupar espaços vazios. As células de condução e suporte morrem em dias, após serem formadas, porém, as células parenquimáticas podem viver vários anos. Klock et al. (2005) afirmam que a morte desta célula marca a transformação do alborno em cerne. Elas podem ocupar cerca de 30 a 35% da massa lenhosa das folhosas e 5 a 10% da massa das coníferas, assumindo a função de armazenar e transportar horizontalmente substâncias nutritivas (Szücs et al. 2015). A parede celular é fina, não lignificada e apresenta pontuações simples, que são orifícios de intercomunicação entre células adjacentes interrompidos apenas por uma membrana, na região da lamela média. De acordo com Nigoski (2016), elas, geralmente, servem como depósitos de amido e, segundo Burger e Richter (1991), em fases iniciais, produzem extrativos e substâncias químicas de defesa.

As células de parênquima unidas podem formar dois tipos de tecidos no lenho das folhosas: o parênquima axial e o raio medular (ou raio parenquimático ou, ainda, parênquima radial). O parênquima axial armazena nutrientes, mas os raios, além do armazenamento, fazem o transporte horizontal de seiva (Szücs et al. 2015). O parênquima axial é um tecido de preenchimento visível no plano transversal e é o principal elemento considerado na identificação de madeiras tropicais por formar padrões que permitem distinguir as espécies.



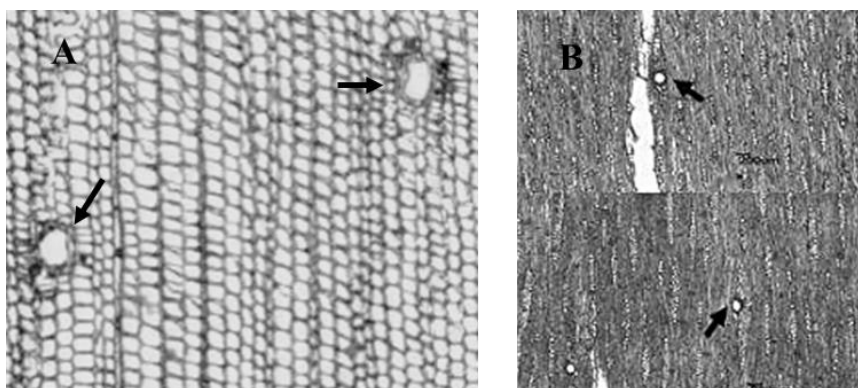
**Figura 2.9:** Tecidos e elementos celulares na madeira de uma folhosa (*Cedrela odorata*)

Nas coníferas, as células de parênquima formam o raio medular. Elas são observadas também circundando os canais resiníferos; neste último caso, o tecido formado recebe o nome raio fusiforme. Os raios das coníferas são finos, normalmente possuem apenas uma fiada de células quando vistos em seção tangencial, e menos frequentemente, bi ou trisseriados (Nigoski 2016).

As fibras, elemento celular componente das folhosas, possuem paredes grossas (de espessura superior à dos vasos) com pequenos espaços internos, normalmente vazios, conhecidos como lúmen e dimensões menores do que as traqueídes de coníferas. Seu comprimento pode variar de 500 μm a 1500 μm, têm formato alongado e secção transversal arredondada; são células fechadas, não possuindo comunicação através das extremidades; apresentam apenas, em certos casos, pontoações. Em algumas espécies, os lúmens das fibras podem estar divididos em pequenas câmaras por finas paredes transversais chamadas septos, e se “comportam” como parênquima (armazenando amido). Elas podem representar de 20 a 80% da massa lenhosa das folhosas e desempenham a

função de suporte. Seu percentual no volume total e a espessura de suas paredes influenciam na densidade e nas propriedades higroscópica e mecânica da madeira.

Nas coníferas, também podem ser encontradas estruturas denominadas canais resiníferos (Fig. 2.10), que têm como função proteger ou defender a planta dos ataques de insetos fitófagos e de fungos, fazendo segregação de resinas (mistura de ácidos resínicos, óleos e álcool). Esses canais não se formam diretamente pelo câmbio, mas se desenvolvem nos espaços intercelulares limitados por células de parênquima, denominadas epiteliais, que contêm resinas acumuladas. Eles podem possuir de 10 cm a 1,0 m de comprimento e 30 a 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro e podem ocorrer naturalmente ou surgir a partir de algum traumatismo no tecido lenhoso. Em certas ocasiões, visualizam-se canais secretores radiais em espécies folhosas (Fig. 2.10).

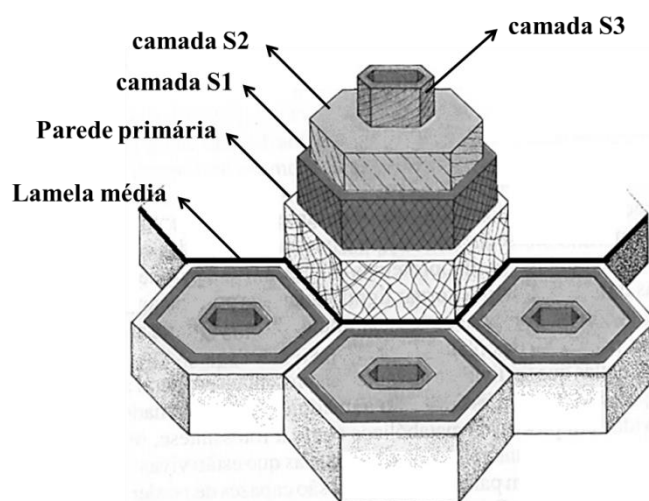


**Figura 2.10:** (A) Canais resiníferos de uma conífera (Nigoski 2016); (B) Canais secretores radiais em uma folhosa (Carréra et al. 2015)

### 2.1.3.1 – Parede celular

A parede celular é uma estrutura exterior à membrana plasmática que confere resistência às células e aos tecidos vegetais. Na madeira, é formada por uma ou mais camadas, dependendo da célula e do tecido observado.

Na divisão celular, inicia-se a formação da parede primária, cuja área é aumentada durante a expansão da célula. Nas fibras, elementos de vaso e traqueídes, concluído o processo de produção da parede primária, a membrana plasmática passa a realizar a deposição da parede secundária com a síntese de novas fibrilas de celulose; paralelamente, tem início o processo de lignificação da parede primária e da lamela média. Com isso, a expansão da célula cessa e se inicia o espessamento da parede celular. Nas traqueídes de condução e nos elementos de vaso, a parede secundária cobre pouco a parede primária formando-se como anéis, bandas em espiral e barras (Eames e MacDaniels 1953). Nas traqueídes de sustentação e nas fibras libriformes se verifica parede secundária espessa que apresenta três camadas que se diferenciam pela disposição das fibrilas de celulose. A figura 2.11 exibe o esquema da parede celular das células de sustentação. Segundo Klock et al. 2005, as camadas S1 e S3 não são morfologicamente consideradas constituintes da parede secundária, mas unidades separadas. Por isso, também são encontrados os termos camada de transição para a camada S1 e parede terciária para a camada S3.



**Figura 2.11:** Camadas da parede celular das células de sustentação e organização das microfibrilas nas paredes primárias e nas camadas S1, S2 e S3 da parede secundária. (Adaptado de Raven, Evert e Eichhorn (1996, apud Nigoski 2016, p. 12)).



### 2.1.3.2 – Variabilidade anatômica e seus efeitos

A complexidade macro e microestrutural da madeira, direcionada pela disposição dos diferentes tipos celulares e tecidos, é o principal fator que permite a distinção entre as inúmeras espécies madeireiras e as diversas aplicações desse material, sendo o determinante de suas propriedades gerais a mecânicas. As características gerais, que englobam cor, textura, figura e grã (Slooten e Souza, 1993) são avaliadas a partir de critérios para classificação visual de peças, onde se pode observar, por exemplo, distribuição de cores e regularidades ou irregularidades na orientação das fibras, sendo estas, características internas macroscópicas. Além de ser usada introdutoriamente nos processos de diferenciação e identificação de espécies madeireiras, esta avaliação permite o estabelecimento de conjecturas relativas ao uso apropriado do espécime arbóreo ou de suas partes com base em conhecimentos práticos já estabelecidos. Seguem as definições, segundo Slooten e Souza (1993):

**COR** – Esta característica diz respeito à cor que o cerne da madeira apresenta devido ao processo de cernificação, com a aglomeração de resinas e substratos. A determinação exata da cor só é possível com a ajuda de análises colorimétricas, mas algumas espécies apresentam alteração nesta característica ao contato com a luz.

**FIGURA** – Classificação comercial que se limita a padrões decorativos, resultantes das camadas de crescimento da árvore e das irregularidades na orientação das células e distribuição de cor não uniforme. O tecido dos raios é considerado, em grande parte, responsável pelo valor decorativo da madeira.

TEXTURA – Resultante das variações nas dimensões das células. A classificação baseia-se, normalmente, no tamanho dos poros e na visibilidade do parênquima, podendo ser considerada média, grossa, ou fina.

GRÃ – Relaciona-se, geralmente, a padrões de inclinação das fibras, podendo ser definida como direita, espiralada, revessa, ondulada e torcida. Considera-se que madeiras utilizadas na confecção de instrumentos musicais devem apresentar grã-direita.

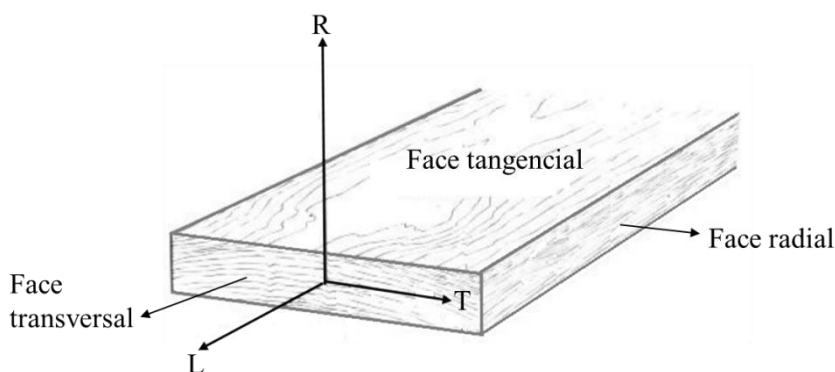
No que tange as propriedades mecânicas, mesmo dentro de uma mesma espécie e um mesmo indivíduo arbóreo, podem ser observadas variações. Castera e Morlier (1994) confirmam a existência de gradientes nas propriedades da madeira que afetam as relações estatísticas entre densidade e módulo de elasticidade, ou módulo de elasticidade e resistência. Os autores concluíram que as características de rigidez à flexão e resistência à flexão são afetadas pela composição anatômica da madeira, influenciadas pela idade da árvore e a posição no caule. O efeito da inclinação das fibras sobre resistência à compressão foi avaliado por Wangaard 1950, Kollmann e Cotê 1968, Dinwoodie 1975, e outros (apud Carrasco e Mantilla, 2016). Carrasco e Mantilla (2016) estudaram o efeito desta inclinação sobre as tensões de cisalhamento em corpos de prova da espécie *Eucalyptus saligna* e afirmaram que a maior ou menor influência depende da espécie. Da mesma forma, diferentes pesquisas mostram que a variabilidade nas propriedades não tem necessariamente um comportamento homogêneo, podendo variar longitudinal ou radialmente, aleatoriamente ou não, ou não apresentar alterações significativas, dependendo das espécies analisadas (Cruz et al. 2003; Valente et al. 2013; Melo et al. 2013; Araújo et al. 2016).

### **2.1.4 – Propriedades mecânicas da madeira**

A NBR 7190 determina que, para a caracterização completa de madeira para uso em estruturas, se execute o cálculo das resistências à tração, à compressão, à flexão, ao cisalhamento e ao embutimento, das densidades básica e aparente e dos módulos de elasticidade nas direções normal e perpendicular às fibras. Nos casos em que a única solicitação imposta a um componente é paralela à orientação das fibras, somente a avaliação dos módulos no sentido longitudinal é realizada. No que diz respeito às propriedades acústicas, parâmetros como velocidade de propagação da onda, amortecimento, coeficiente de radiação sonora são considerados e, segundo Costa (2017), são determinados, em grande parte, pelas propriedades elásticas e pela massa específica do material.

#### **2.1.4.1 - Módulo de elasticidade**

No que tange as propriedades elásticas da madeira, a orientação axial dos elementos celulares tem direcionado seu estudo à adoção de um modelo de simetria ortotrópica, onde se verificam três planos ortogonais e três eixos principais de simetria elástica: longitudinal L (direção paralela às fibras), radial R (perpendicular aos anéis de crescimento) e tangencial T (tangente aos anéis de crescimento) (Fig. 2.12). Segundo estes planos, as propriedades elásticas são determinadas (Ballarin e Nogueira 2005; Mascia 1991).



**Figura 2.12:** Direções principais na madeira: L – longitudinal (paralela às fibras), R – Radial (perpendicular aos anéis de crescimento), T – Tangencial (tangente aos anéis de crescimento). Adaptado de Wilcox et al. (1991, apud Szücs et al. 2015, p.26)

Nesta abordagem, a determinação completa das propriedades elásticas é realizada a partir da aplicação de cargas nas três direções principais, de modo que são determinados os módulos elásticos nas três direções, e os módulos de rigidez e coeficientes de Poisson nos planos transversal, tangencial e radial. Por outro lado, segundo Pfeil (2003), a diferença entre as direções radial e tangencial raramente tem importância prática, sendo suficiente a avaliação das propriedades nas direções longitudinal e perpendicular às fibras. Nos casos em que a única solitação imposta a um componente é paralela à orientação das fibras, somente a avaliação dos módulos no sentido longitudinal é realizada.

As dificuldades envolvidas na caracterização dos módulos elásticos por meio de ensaios convencionais, denominados destrutivos, e o conhecimento das relações existentes entre módulos elásticos e propriedades acústicas provocaram o desenvolvimento de técnicas não destrutivas diversificadas. De modo geral, as técnicas em questão utilizam a frequência natural de vibração ou a velocidade de propagação de onda ultrassônica, propriedades acústicas intrínsecas do material, para a aquisição de valores das propriedades elásticas (Rosa et al. 2014; Ballarin e Nogueira 2005). Entre as vantagens da utilização de

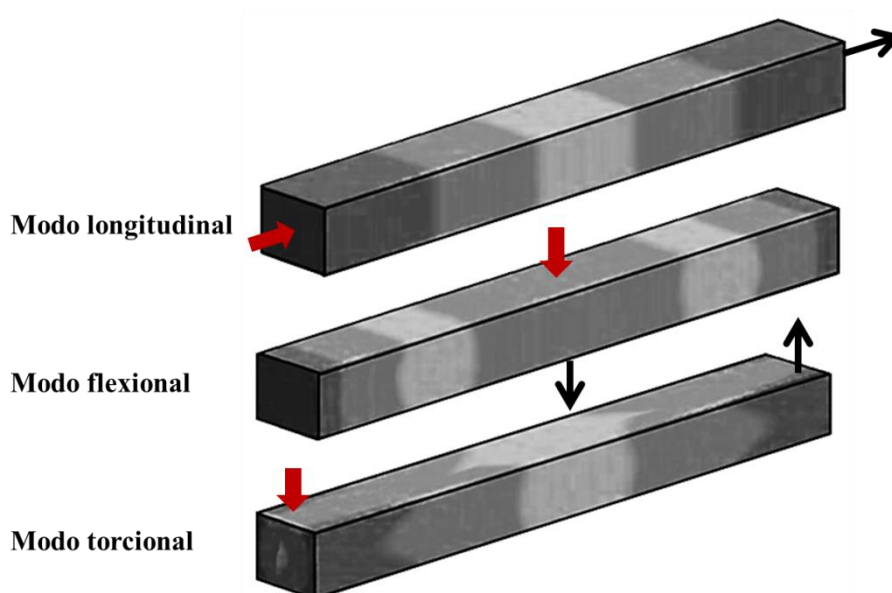
métodos não destrutivos, apresentam-se o custo relativamente inferior, a fácil adequabilidade das ferramentas a espaços físicos limitados e a possibilidade de se testar o mesmo corpo de prova quantas vezes forem necessárias.

#### **2.1.4.2 - Técnica de excitação por impulso (TEI)**

Esta técnica se baseia no fenômeno vibratório pelo qual, após receber um impacto de curta duração, um corpo tende a vibrar em modos de vibração e frequências características que estão intimamente relacionadas à geometria e ao material que compõe o corpo, e às condições de contorno impostas. Estes são também denominados modos e frequências naturais de vibração e, ainda, modos e frequências de ressonância. Para corpos de geometria regular (vigas retangulares, cilindros e discos) que vibram livremente sob impacto, as frequências de ressonância são determinadas pelo módulo de elasticidade, pela massa e pelas dimensões do corpo (ASTM E1876 2015). As relações entre estes parâmetros têm levado ao desenvolvimento de modelos matemáticos pelos quais, as propriedades acústicas, de mais fácil aquisição por ensaios mecânicos, são usadas no cálculo do módulo de elasticidade (Pickett 1945; Spinner *et al.* 1960; Spinner e Tefft 1961; Barboni *et al.* 2018). O módulo assim determinado recebe a especificação módulo dinâmico de elasticidade ( $MOE_d$ ) por ser obtido a partir de cargas dinâmicas.

Além do módulo elástico, é possível calcular também o módulo de cisalhamento, e o que determina o módulo a ser calculado é o modo de vibração excitado e, portanto, o ponto de aplicação do impacto. Uma viga de secção transversal quadrada que sofre um impacto de curta duração, sem restrição significativa à vibração, pode apresentar modos de vibração longitudinal, flexional e torcional. A figura 2.13 apresenta estes modos e indica as

respectivas regiões de aplicação do impulso (seta vermelha) e de captação da vibração (seta preta).



**Figura 2.13:** Modos de vibração da viga prismática. Regiões claras indicam pontos onde a amplitude de vibração é mínima e regiões mais escuras indicam os pontos de maior amplitude de vibração. Setas vermelhas indicam ponto, direção e sentido de aplicação do impulso para região de captação das vibrações e setas pretas indicam para o estímulo dos respectivos modos de vibração.

A expressão a seguir foi desenvolvida para aquisição do  $MOE_d$  a partir de um corpo de prova de secção transversal retangular, sujeito a uma excitação que induz o modo longitudinal de vibração (ASTM E1876 2015):

$$MOE_d = 4 * m * f_l^2 * \left[ \frac{L}{b * t * K} \right] \quad (1)$$

$L$  é o comprimento do corpo de prova (mm),  $m$  é a massa do corpo de prova (g),  $f_l$  é a frequência natural fundamental;  $b$  largura;  $t$  espessura e  $K$  é um fator de correção:

$$K = 1 - \left[ \frac{\pi^2 * \mu^2 * D_e^2}{8 * L^2} \right] \quad (2)$$

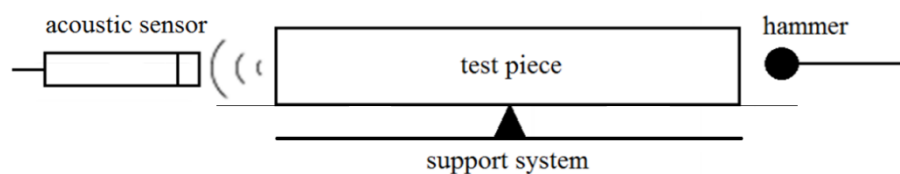
$\mu$  é o coeficiente de Poisson e  $D_e$  é o diâmetro efetivo do corpo de prova (mm), dado (1)

por:

$$D_e^2 = 2 * \frac{b^2 + t^2}{3} \quad (3)$$

$b$  é a largura do corpo de prova (mm) e  $t$  a espessura (mm).

A frequência natural fundamental, empregada no cálculo do  $MOE_d$ , é obtida por meio do teste de impulso do corpo de prova. Este, devidamente dimensionado, é apoiado sobre cabos tensionados em suas regiões nodais, ou seja, de mínima amplitude (Fig. 2.12), a fim de se evitar amortecimento externo das oscilações (ASTM E1876 2015). O sensor acústico é posicionado e direcionado de modo a captar as vibrações e o impulso é aplicado fazendo com que o corpo de prova vibre emitindo um sinal sonoro. Este, sendo captado pelo sensor recebe um tratamento matemático (Transformada Rápida de Fourier - Heideman *et al.* 1985), pelo qual se obtém o espectro de frequências do sinal (Otani e Pereira 2016). A figura 2.14 indica os locais de aplicação do impulso, de captação do sinal sonoro resultante e as condições de apoio do corpo de prova, adotados quando se deseja determinar o módulo elástico longitudinal, como indicado por Lord e Morrel (2006).

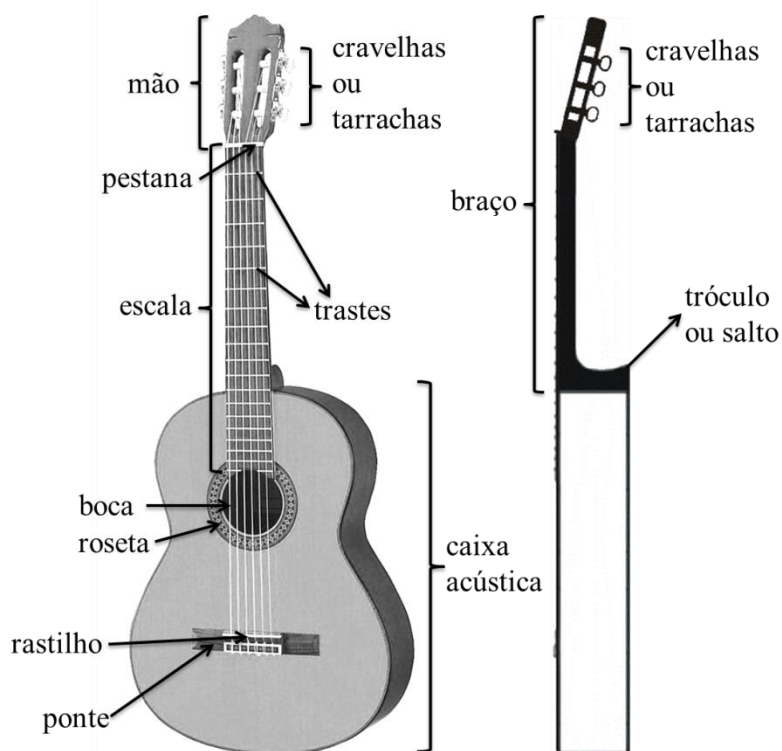


**Figure 2.14:** Locais de aplicação do impulso e captação do sinal sonoro resultante e condições de apoio do corpo de prova na determinação do módulo elástico longitudinal

Lord e Morrel (2006) afirmam que a precisão nos dados obtidos por métodos dinâmicos é da ordem de 1%. Entre os cuidados no acabamento do corpo de prova, o paralelismo e a planicidade das faces são indicados para uma tolerância 0,3 %.

## 2.2 – O violão e seu comportamento vibroacústico

O violão é um instrumento musical acústico temperado formado basicamente por uma caixa de ressonância, ou caixa acústica, e um braço. Estes, por sua vez, são compostos por estruturas menores que executam diferentes funções e, por aspectos construtivos, diferenciam este instrumento dos demais cordófonos (instrumentos musicais cujo som é produzido pela vibração de uma ou mais cordas). A figura 2.15 esboça um violão de modelo clássico e seus componentes.

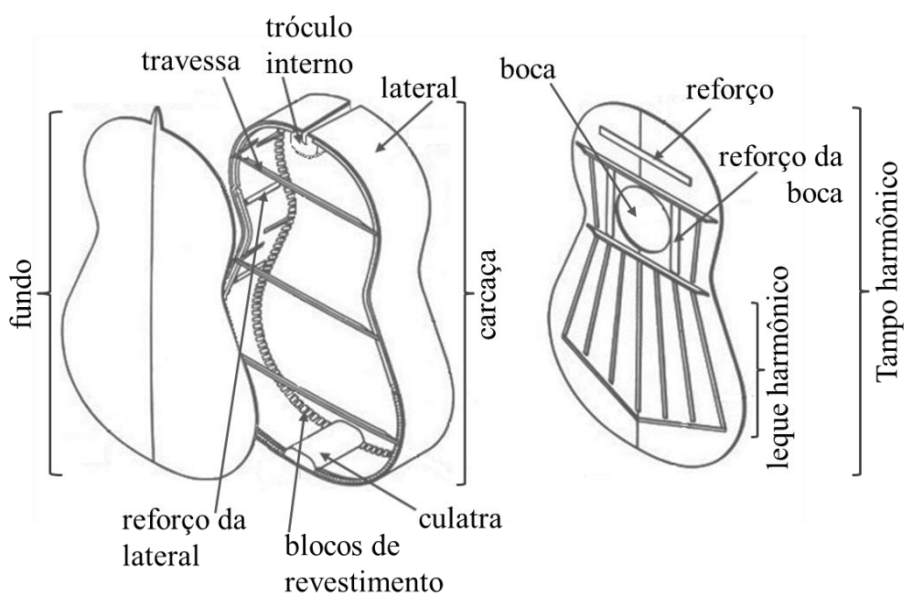


**Figure 2.15:** Componentes externos do violão

Como já difundido largamente, a produção de som no violão se inicia com o estímulo da corda tensionada. Esta vibra segundo suas frequências naturais, cujo valor é função da tensão à qual ela está sujeita, do material de que é feita, e da sua espessura.



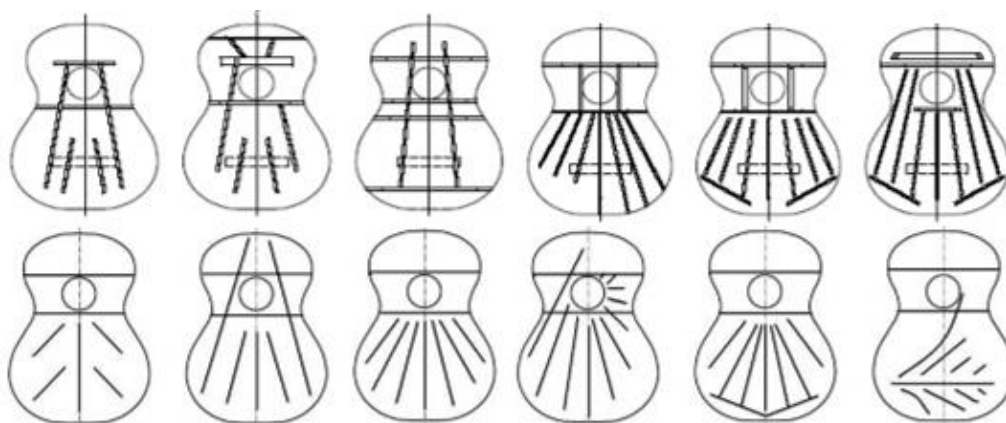
Estando conectada à caixa acústica, transmite a esta parte da energia, fazendo com que a caixa vibre. De fato, apesar da considerável quantidade de energia envolvida na oscilação da corda, o volume de ar que esta põe em movimento é pequeno e, por isso, o som gerado unicamente pela corda é baixo. A caixa acústica, por outro lado, é capaz de produzir som de amplitude considerável devido à ampla área de contato com o ar e se constitui no principal componente de produção sonora do violão.



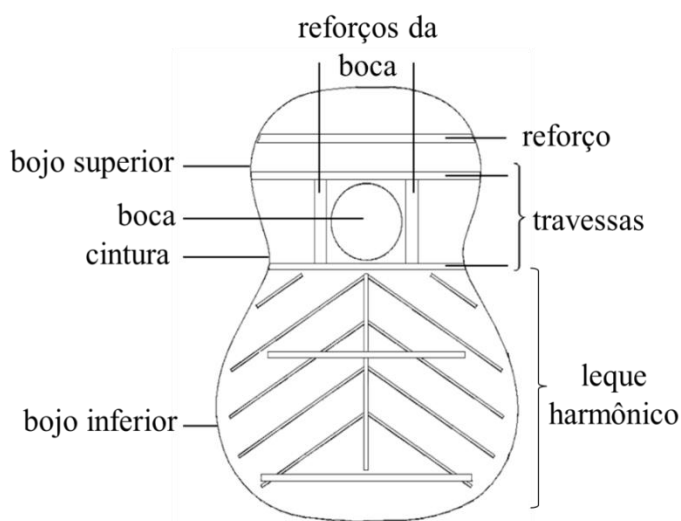
**Figura 2.16:** Componentes internos da caixa acústica

Como órgão ressonador do violão, a caixa acústica é responsável não apenas pela amplificação do volume sonoro, mas também pela definição do timbre do instrumento, uma vez que as características construtivas, como dimensões estruturais, configuração de leque harmônico e propriedades do material de cada um de seus elementos interferem na vibração, dando a cada violão uma característica tímbrica particular. Dentre estes elementos, o tampo harmônico, receptor direto da vibração das cordas, é responsável por grande parte do som emitido, sendo, então, considerado o principal componente da caixa

(Fletcher e Rossing 2008). Diante disso, especial atenção é direcionada a ele e diferentes configurações de leque harmônico têm sido desenvolvidas objetivando atribuir-lhe características harmônicas variadas (Roest 2016). Algumas destas configurações foram esboçadas por Curtu et al. (2008) e são apresentadas na figura 2.17. Além destas, expõe-se, na figura 2.18, o arranjo “espinha de peixe” adotado em violões clássicos pelo luthier Antônio Maurício Barros, construtor do violão usado neste projeto. As alterações inseridas no tampo devido ao emprego deste arranjo, relativamente ao modelo tradicional de Torres, foram analisadas por Ribeiro et al. (2013) e verificou-se acréscimo no valor de parte das frequências naturais do tampo.



**Figura 2.17:** Tapos harmônicos com diferentes configurações de leque. (Curtu et al. 2008)



**Figura 2.18:** Regiões do tampo e configuração do leque harmônico aplicado

A interferência dos demais componentes nas propriedades vibroacústicas do violão tem sido investigadas. Difunde-se que o fundo é uma estrutura reflexiva, tendo a função de enviar de volta ao tampo a energia recebida na forma de onda de pressão do ar enclausurado na caixa. Como algumas frequências são refletidas mais eficientemente que outras, admite-se que ele também contribui na definição tímbrica e, segundo Slooten e Souza (1993), deve produzir notas um tom acima das produzidas pelo tampo; a influência de suas travessas na radiação sonora foi citada por Lee et al. 2016. A lateral, por outro lado, exerce várias funções importantes, contudo, não contribui significativamente para a produção sonora por ser muito rígida; este parecer tem sido confirmado por estudos (French 2008, Ribeiro 2014). Ela determina a distância entre tampo e fundo e a diferença angular entre eles, criando uma câmara de pressão sonora que faz com que as ondas fiquem contidas no interior da caixa e sejam dirigidas de maneira adequada.

Os violões clássicos se diferenciam de outros modelos devido a características estruturais específicas, como formato, leque harmônico, largura do braço, e por levarem encordoamento de nylon, o que lhes confere timbre mais aveludado, relativamente aos

modelos com corda de aço. O braço mais largo o torna agradável a instrumentistas iniciantes porque a distância maior entre as cordas facilita a execução, e este fator levantou, entre alguns, a crença equivocada de que este seria um modelo para instrumentistas amadores, o que foge completamente da realidade. De fato, as diferenças construtivas entre os diferentes modelos de violão se direcionam aos variados estilos musicais, de modo que a qualidade do instrumento deve ser considerada de acordo com a resposta que cada estilo exige.

### **2.3 – Análise Modal**

A análise modal é uma ferramenta pela qual se obtém a descrição de uma estrutura por meio de suas características dinâmicas naturais, que são: as frequências naturais, os modos de vibração e o amortecimento (estes são conhecidos como parâmetros modais). É sabido que, quando um sistema estrutural é solicitado por um carregamento dinâmico cuja frequência coincide com uma das frequências naturais da estrutura, esta entra em ressonância, isto é, vibra com amplitudes maiores; além disso, quando a estrutura é excitada por um impacto de curta duração, emite um sinal sonoro formado por todas as suas frequências naturais, e esse conjunto característico de frequências não será encontrado em qualquer outra estrutura. Carregamento dinâmico, por sua vez, é aquele que varia com o tempo, seja em magnitude, em direção, ou com relação ao ponto de aplicação; o resultado do carregamento dinâmico é uma resposta dinâmica.

Como parâmetros dinâmicos de uma estrutura, as frequências e os modos de vibração associados dependem das características do sistema como um todo (massa, geometria e condições de contorno), assim como o amortecimento. Porém, este também pode variar de acordo com a frequência, ou seja, cada vibração é amortecida de modo

particular. A amplitude das vibrações só depende, a princípio, da amplitude da solicitação, mas, como já dito, pode ser aumentada na ocorrência de ressonância.

A principal finalidade da análise modal é determinar como uma estrutura responde a carregamentos dinâmicos e, segundo Vale (1996), ela pode ser realizada por métodos analíticos, experimentais ou numéricos, e a escolha de um desses métodos está condicionada à dimensão, à complexidade do problema e aos objetivos almejados. Nos métodos analíticos, empregam-se modelos matemáticos cuja solução se obtém por integração ou derivação das leis fundamentais da dinâmica, tanto para sistemas discretos como contínuos. Estes são viáveis para problemas com poucos graus de liberdade, porém, quando os problemas são complexos e de grande dimensão, sua adoção se torna inviável e a escolha por métodos numéricos se faz adequada.

### **2.3.1 – Análise modal experimental**

Vale (1996) menciona que, nos procedimentos experimentais, há necessidade de um protótipo. Este é ensaiado experimentalmente para aquisição dos parâmetros modais, e o resultado é normalmente considerado para validação de modelos numéricos. Como as técnicas de análise experimental se baseiam em técnicas não destrutivas, faz-se possível ensaiar a estrutura quantas vezes forem necessárias.

As principais técnicas experimentais para mensuração dos parâmetros modais são a varredura de frequência ou a técnica de excitação por impulso. Na varredura de frequência, a estrutura é posta a vibrar em um intervalo contínuo de frequências e, ao aproximar-se de uma frequência natural, a estrutura apresenta ressonância; por este método, também é possível obter os modos de vibração com uso das técnicas de Chladni, interferometria

holográfica, etc. (Elejabarrieta et al. 2002, Curtu et al. 2008, Richardson 2010). No método de excitação por impulso, um impacto leve de curta duração é aplicado à estrutura, que responde com um sinal sonoro, que é captado e tratado de modo a se obter o seu espectro de frequências. Estas frequências que compõem o sinal são as frequências naturais da estrutura, e as amplitudes dos picos indicam a representatividade relativa de cada uma delas. Por este método, não é possível o exame dos modos de vibração, uma vez que a estrutura responde simultaneamente em todas as frequências e a identificação individual do modo se torna inviável. O equipamento para aplicação desta técnica engloba aparato específico para apoio da estrutura, um pulsador manual ou automático, sensor de sinal sonoro, e PC munido de software de tratamento de dados e obtenção da FFT (Cochran 1967).

### **2.3.2 – Análise modal numérica**

Com base no método de elementos finitos, a análise modal é um pré-requisito para a execução de outras análises como a espectral e as análises harmônica e transiente. Na análise modal numérica via Ansys (software de elementos finitos), o sistema de equações montado é resolvido como um problema de autovalor e autovetor, onde os autovalores são as frequências naturais do sistema e os autovetores definem os modos naturais de vibração associados a elas; não há aplicação de carregamentos externos e também não há aplicação, pelo usuário, de uma condição inicial de deslocamento; por isso, os deslocamentos gerados pelo software como resposta modal da estrutura são relativos. As condições iniciais impostas a um sistema determinam a amplitude da resposta, mas não influenciam os modos, os valores de frequência e os valores de amortecimento (ANSYS, 1992).

Para sistemas não amortecidos a equação de equilíbrio é expressa, em notação matricial, da seguinte maneira:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (4)$$

$[M]$  – matriz de massa;  $[K]$  – matriz de rigidez da estrutura;  $\{u\}$  – deslocamento do sistema;  $\{\ddot{u}\}$  – aceleração do sistema.

Para o sistema linear, as vibrações livres serão harmônicas e da forma:

$$\{u\} = \{\Phi\}_i \cos \omega_i t \quad (5)$$

$\Phi_i$  – autovetor relacionado à  $i$ ésima frequência;  $\omega_i$  –  $i$ ésima frequência natural circular;  $t$  – tempo.

$$(-\omega_i^2 [M] + [K]) \cdot \{\Phi\}_i = 0 \quad (6)$$

$$| -\omega_i^2 [M] + [K] | = 0 \quad (7)$$

Este problema pode ser resolvido para até  $m$  autovalores  $\omega_i$  e  $m$  autovetores  $\{\Phi\}_i$  sendo  $m$  o número de graus de liberdade considerados no problema. É importante destacar que os modos de vibração representam somente a configuração deformada da estrutura quando esta vibra com determinada frequência. O valor absoluto das componentes que constituem o vetor modo de vibração não tem qualquer significado, apenas a relação entre essas componentes é importante. Por isso, há uma infinidade de representações possíveis para o mesmo modo de vibração, de modo que se torna comum adotar uma norma que facilite a interpretação e a comparação entre essas componentes.

No modo padrão de resposta do Ansys, cada autovetor  $\{\Phi\}_i$  é normalizado, de modo que:

$$\{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i = 1 \quad (8)$$

Outro tipo de normalização, não sendo esta padrão do programa, é aquela mediante a qual o maior componente de  $\{\Phi\}_i$  tem valor 1.

Quando o sistema é amortecido, a matriz de amortecimento deve ser incluída na equação. Neste caso, o problema se torna um problema quadrático de autovalor, dado por:

$$[K]\{\Phi_i\} + \lambda_i^* [C]\{\Phi_i\} = -\lambda_i^{*2} [M]\{\Phi_i\} \quad (9)$$

$\lambda_i^* = \sqrt{-\lambda_i}$ ; [C] – matriz de amortecimento.

A equação acima é resolvida de modo a se obter os autovalores complexos  $\lambda_i^*$  dados por:

$$\lambda_i^* = \sigma_i \pm j \omega_i \quad (10)$$

$j = \sqrt{-1}$ ;  $\sigma_i$  e  $\omega_i$  partes real e imaginária do número complexo  $\lambda_i^*$ .

Assim, a resposta dinâmica do sistema é dada por:

$$\{u_i\} = \{\Phi_i\} e^{(\sigma_i \pm j \omega_i)t} \quad (11)$$

Se nenhuma restrição a deslocamentos é aplicada ao sistema, os seis primeiros modos de vibração apresentados como resposta são os denominados *movimentos de corpo rígido*. Para estes casos, a frequência é nula ou aproximadamente nula.

#### 2.4 – As madeiras amazônicas

Já na década de 60, a escassez de algumas espécies de madeira brasileira era detectada. Mas, a nível governamental, pouco foi feito a fim de se resolver o problema e as



ações foram limitadas à proibição da extração das espécies escassas. Visando introduzir no mercado de instrumentos musicais novas espécies capazes de substituir as escassas, uma pesquisa envolvendo madeiras amazônicas foi iniciada na década de 80 com os pesquisadores Harry Jan Der Slooten e Mário Rabelo de Souza e fomentada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Em 1993, um catálogo de madeiras para instrumentos musicais foi montado. Para a montagem deste catálogo, realizaram-se comparações entre espécies tradicionais como o Spruce europeu e o Jacarandá da Bahia (já em fase de extinção nessa época) e espécies amazônicas não conhecidas no setor. A comparação foi estabelecida a partir da determinação de características gerais da madeira, que englobam cor, textura, figura e grã; das propriedades físicas: densidade básica, contrações volumétrica, tangencial e radial, e teor de umidade inicial; e de propriedades mecânicas. Realizou-se também análise de secagem e da estabilidade dimensional das madeiras. As espécies que apresentaram características mais próximas das espécies tradicionais foram pré-selecionadas e direcionadas ao uso em instrumentos de corda ou sopro. Passou-se à análise das propriedades acústicas das espécies pré-selecionadas para instrumentos de corda, a partir dos princípios de ressonância e das propriedades de radiação do som. Os testes foram conduzidos pelo Laboratório de Produtos Florestais em Brasília, e o método de vibração forçada utilizado para determinar a frequência natural de vibração (para as dimensões específicas adotadas no corpo de prova) e o decaimento logarítmico, segundo Hearmon (1968, apud Slooten & Souza 1993, p.27). Por este método, duas pequenas chapas de metal são fixadas nas extremidades do corpo de prova apoiado sobre fios nos seus pontos nodais. Próximos às chapas, dois eletrodos são anexados, um deles alimentado com corrente alternada para excitar as vibrações, e o outro servindo como detector da resposta do corpo

de prova. A frequência da corrente elétrica é variada detectando ressonâncias e medidas extraídas do espectro de frequências são utilizadas para o cálculo do decaimento logarítmico:

$$DL = \frac{\pi * \Delta f}{\sqrt{3} * f_l} \quad (12)$$

$DL$  é o decaimento logarítmico;  $\Delta f$  é a diferença entre as frequências que apresentam a metade da amplitude de vibração da frequência de ressonância à esquerda e à direita do pico de amplitude da frequência fundamental;  $f_l$  é a frequência de ressonância fundamental.

O autor definiu o parâmetro denominado resistência à onda sonora ( $W$ ), de modo que, quanto menor a resistência sonora, melhor a qualidade acústica do material.

$$w = \sqrt{(\rho * E)} \quad (13)$$

$w$  - resistência à propagação sonora,  $\rho$  - densidade,  $E$  - módulo de elasticidade.

Teles (2005) deu prosseguimento à pesquisa de Slooten e Souza (1993) investigando e acrescentando outras espécies à lista de madeiras pré-selecionadas. Determinaram-se propriedades consideradas ideais para os diferentes elementos do violão e para outros instrumentos. Para lateral e fundo selecionaram-se madeiras com características semelhantes ao jacarandá da Bahia (*Dalbergia nigra*) e ao maple (*Acer sp.*): massa específica variando entre 0,53 e 0,92 g/cm<sup>3</sup> e frequência abaixo de 180 Hz (o valor em frequência é decorrente também da geometria do corpo de prova e do modo de vibração estimulado); além disso, decaimento logarítmico abaixo de 0,027 e velocidade de propagação sonora entre 3700 e 4800 m/s, grã direita ou ondulada, textura média a fina, boa trabalhabilidade, que propiciasse boa colagem, que permitisse bom acabamento e tivesse boa estabilidade dimensional; não houve restrições quanto às propriedades mecânicas. Quanto ao tampo, buscaram-se madeiras com características semelhantes ao

spruce (*Picea abies*), textura média a fina e grã direita, de baixa massa específica (0,40 e 0,55 g/cm<sup>3</sup>), frequência acima de 150 Hz, decaimento logarítmico abaixo de 0,027 e velocidade de propagação sonora entre de 4000 e 5200 m/s, alto módulo de elasticidade, boa trabalhabilidade, boa estabilidade dimensional, boa para colagem e que permitisse bom acabamento final. Algumas espécies fora de alguns destes critérios foram selecionadas por apresentarem excelentes propriedades acústicas.

As espécies examinadas na presente pesquisa foram extraídas da lista de madeiras pré-selecionadas por Teles (2005), sendo as seguintes: maçaranduba (*Manilkara huberi*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), freijó (*Cordia goeldiana*) e cedro rosa (*Cedrela odorata*). Para a confecção de corpos de prova, peças foram retiradas de caibros ou pranchões, conforme disponibilidade no mercado. Para as espécies freijó e cedro, foi possível adquirir peças de três diferentes indivíduos arbóreos e, para se garantir isto, adotou-se um método de compra por lote, ou seja, cada peça adquirida foi retirada de um lote diferente. Este processo não foi realizado para as espécies maçaranduba e muiracatiara pela indisponibilidade de lotes diferentes ou pela impossibilidade de se assegurar a diferenciação, devido ao modo de estocagem.

Adiante, são apresentadas características gerais das espécies adquiridas para o projeto, apresentadas por Slooten e Souza (1993) e/ou retiradas do site do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de S. Paulo (IPT):

(<[https://www.ipt.br/consultas\\_online/informacoes\\_sobre\\_madeira/busca](https://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca)> Último acesso: 04/08/2019).

### 2.4.1 – Freijó

Nome científico: *Cordia goeldiana* Huber

Família: Boraginaceae.

Nomes comuns: frei-jorge, freijó-branco, freijó-preto, freijó-rajado, freijó-verdadeiro, louro-freijó. Nomes internacionais: freijó, laurel blanco (América Central), pardillo (Venezuela), salmwood (Grã Bretanha).

Ocorrência: Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia.

Características gerais: cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho-claro-amarelado, pode apresentar manchas e estrias enegrecidas; superfície lustrosa; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade baixa; grã direita a revessa; textura média; de fácil aplainamento e serragem.

Contração volumétrica: 10,6 %

Velocidade de propagação sonora: 4655 m/s

Parênquima axial: invisível mesmo sob lente, às vezes paratraqueal vasicêntrico e Aliforme, escasso, ocasionalmente marginal em linhas curtas irregulares;

Anéis de crescimento: distintos individualizados por zonas fibrosas tangenciais mais escuras e pelo arranjo tangencial dos vasos.

Indicações para uso em instrumentos musicais: tampo de violão, corpo de guitarra e contrabaixo, gaitas diatônicas.



**Figura 2.19:** A – face transversal; B – face radial; C – face tangencial (freijó).  
(Ampliação: 50x)

Outras aplicações: portas, venezianas, caixilhos, lambris, painéis, molduras, guarnições, forros; ripas; móveis finos e decorativos de alta qualidade; montantes de escadas singelas ou extensíveis, degrau de escadas singelas ou extensíveis, artigos de esporte e brinquedos; instrumentos musicais ou componentes; moldes e modelos; decoração e adorno.

#### 2.4.2 – Cedro rosa

Nome científico: *Cedrela odorata*

Família: Meliaceae

Outros nomes populares: cedro-amargo, cedro-amargoso, cedro-batata, cedro-branco, cedro-cheiroso, cedro-do-amazonas, cedro-manso, cedro-rosa, cedro-verdadeiro, cedro-vermelho. Nomes internacionais: acajou femelle, ceder, cedes, cedo clavel (Colômbia), cedre acajou (Guiana Francesa), cedro amargo (Panamá), cedro amarillo (Venezuela), cedro blanco, cedro caoba, cedro colorado (Peru), cedro de castilla (Equador), cedro hembra (Rep. Dominicana), cedro macho (Cuba), cedro oloroso, cedro real (El Salvador), cedro-rosa (Suriname), cigarbox (Estados Unidos), cóbano (Costa Rica), culche (México), kurana (Guiana), spanish cedar (Estados Unidos; Inglaterra).

Ocorrência: Brasil - Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rondônia, Santa Catarina, São Paulo. Outros países: América Central, Argentina, Bolívia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Paraguai, Peru, Suriname.

Características sensoriais: cerne e albúrne distintos pela cor, cerne bege rosado; superfície lustrosa; cheiro perceptível, agradável e característico, gosto ligeiramente amargo; densidade baixa; grã direita; textura média a grossa; bom aplainamento, torno e brocagem.

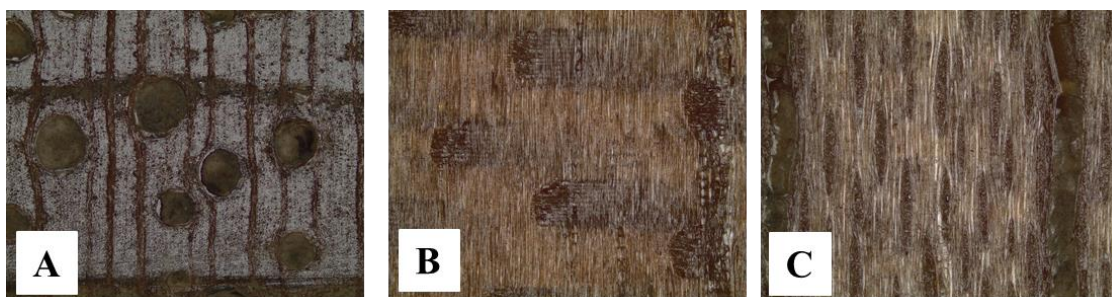
Contração volumétrica: 11,6 %

Velocidade de propagação sonora: 4622 m/s

Parênquima axial: visível a olho nu, em faixas marginais afastadas e contrastadas.

Anéis de crescimento: distintos, individualizados pelo parênquima marginal e distribuição dos vasos em anéis semiporosos.

Indicações de uso para instrumentos: braço de violão, guitarra e contrabaixo; corpo de guitarra e contrabaixo; flautas e fagotes; baterias conga e bongôs.



**Figura 2.20:** A – face transversal; B – face radial; C – face tangencial (cedro rosa).  
(Ampliação: 50x)

Outras aplicações: portas, venezianas, caixilhos, lambris, painéis, molduras, guarnições, forros, móveis finos e decorativos de alta qualidade, chapas compensadas, embalagens, molduras para quadros, moldes e modelos, decoração e adorno (escultura e entalhe),

decoreção e adorno, instrumentos musicais ou parte deles, embarcações (coberturas, pisos, forros).

### 2.4.3 – Maçaranduba

Nome científico: *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev

Família: Sapotaceae

Nomes comuns: maçaranduba-da-terra-firme, aparaiú, aprauá, balata, chauá, maçaranduba-amarela, maçaranduba-branca, maçaranduba-da-marinha, maçaranduba-de-leite, maçaranduba-do-ceará, maçaranduba-preta, maçaranduba-roxa, maçaranduba-verdadeira, maçaranduba-vermelha, maparajuba, maraju, marajuba, mpraiú.

Ocorrência: Brasil - Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rondônia, Santa Catarina. Outros países - América Central, Colômbia, Guiana, Peru, Suriname.

Características gerais: cerne e alburno distintos pela cor; cerne avermelhado, sem alteração de cor por foto-oxidação; apresenta brilho nas superfícies longitudinais; cheiro imperceptível, textura fina ou grossa; aplainamento, torno e brocagem fácil e/ou excelente.

Contração volumétrica: 15 %

Velocidade de propagação sonora: 3994 m/s

Parênquima axial: observado a olho nu, em faixas estreitas ou linhas.

Anéis de crescimento: pouco distintos a indistintos.

Indicação de uso em instrumentos: escala de violões, guitarras e contrabaixos; clarinetas e oboés; baterias, conga e bongôs; baquetas.



**Figura 2.21:** A – face transversal; B – face radial; C – face tangencial (maçaranduba). (Ampliação: 50x). Fonte: IPT

Outras aplicações: dormentes ferroviários, pontes, cruzetas, estacas; tesouras, vigas, caibros, tacos e parquetes de assoalhos, puxadores e entalhes de mobiliário de alta qualidade, peças torneadas, arcos de violinos, tacos de bilhar.

#### 2.4.4 – Muiracatiara

Nome científico: *Astronium lecointei* Ducke

Família: Anacardiaceae.

Nomes comuns: aderno-preto, aroeira, aroeirão, baracatiara, gonçaleiro, gonçalo-alves, maracatiara, maracatiara-branca, maracatiara-vermelha, muiracatiara-rajada, muiraquatiara, sanguessugueira Nomes internacionais: gonçalo alves, gonçalo alvez.

Ocorrência: Amazônia, Acre, Amapá, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia.

Características gerais: cerne e alburno distintos pela cor, cerne variável do bege-rosado ao castanho-escuro-avermelhado, com estrias mais escuras; brilho moderado; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade alta; dura ao corte; grã irregular; textura média; aplainamento regular ou ruim; torno, brocagem e serragem excelente, fácil/excelente e fácil, respectivamente.



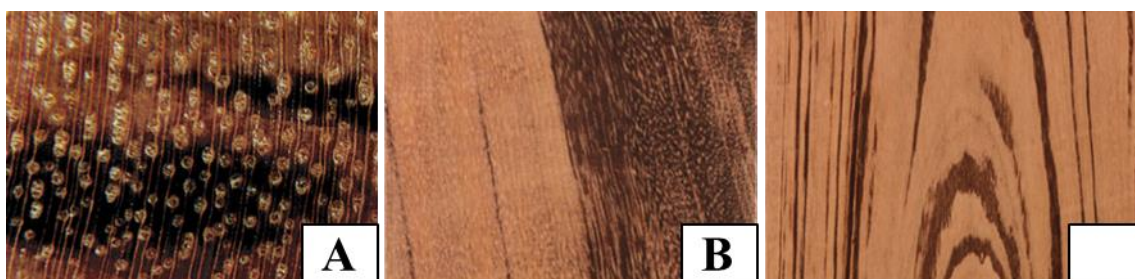
Contração volumétrica: 11,9 %

Velocidade de propagação sonora: 4401 m/s

Parênquima axial: invisível mesmo sob lente. Com aumento de 200x é possível observar células parenquimáticas contornando os vasos.

Anéis de crescimento: indistintos.

Indicação de uso em instrumentos: braço, escala, lateral e fundo de violão; escala de guitarra e contrabaixo; clarinetas e oboés; gaitas diatônicas; baqueta.



**Figura 2.22:** A – face transversal; B – face radial; C – face tangencial (muiracatiara). (Ampliação: 50x). Fonte: IPT

Outras aplicações: tesouras, vigas e caibros para telhados; venezianas, portas, caixilhos, batentes, janelas, cordões, guarnições, rodapés, forros, lambris; tábuas, tacos e parquetes de assoalhos, móveis de alta qualidade, peças torneadas; cabos para cutelaria, cabos de ferramentas, peças curvadas.

## 2.5 – Levantamento de mercado

Para investigação do cenário atual de comercialização das madeiras nacionais no mercado nacional e internacional, realizou-se levantamento de mercado a partir de informações disponibilizadas em sites de vendas e páginas de fabricantes. A tabela 2.1

apresenta os resultados quanto às espécies de madeira usadas atualmente no setor produtivo de instrumentos de corda e percussão.

**Tabela 2.1:** Relação de fabricantes e madeiras usadas em instrumentos musicais

<b>Fabricantes</b>	<b>Instrumentos de percussão, corda e componentes.</b>	<b>Espécies</b>
<b>Di Giorgio</b>	<b>Acústicos</b>	
	Tampo	spruce canadense, kaoba, oregon pine
	Escala	ébano, <b>pau-ferro</b>
	fundo e lateral	indian rosewood, <b>pau-ferro</b> , maple, zebrano
	Braço	mogno asiático, <b>cedro rosa</b>
<b>Gianinni</b>	<b>Acústicos</b>	
	Tampo	cedro vermelho, abeto alemão, <b>marupá</b> , spruce, linden, sitka spruce, basswood, zebra wood, agathis, sapelle, cedro vermelho
	Escala	ébano, maple, rosewood, <b>pau-ferro</b>
	fundo e lateral	<b>muiracatiara, louro faia</b> , indian rosewood, <b>muirapiranga, imbuia, pau-ferro</b> , cedro, linden, agathis, zebra, sapelle, basswood, ovankol, rosewood, mogno, zebra
	Braço	african mahogany, cedro, catalpa, solid basswood, okoume, nato, mogno
	<b>Baixo</b>	
	Corpo	Poplar
	Braço	Maple
	Escala	Rosewood
	<b>Guitarra</b>	
	Corpo	Basswood
Escala	Rosewood	
Braço	Maple	
<b>Yamaha</b>	<b>Acústicos</b>	
	Tampo	sitka spruce, spruce alemão, spruce europeu, american redcedar, hokkaido spruce, western redcedar,
	Escala	ébano, rosewood
	fundo e lateral	okume, maple, indian rosewood, rosewood, madagascar rosewood, mahogany, ovankol, cypress, meranti
	Braço	mahogany, rosewood, african mahogany, cedro, nato
	<b>Guitarra</b>	
	Corpo	maple, mahogany, alder, agathis, nato
	Escala	rosewood, maple, laurel
Braço	mahogany, nato, maple	

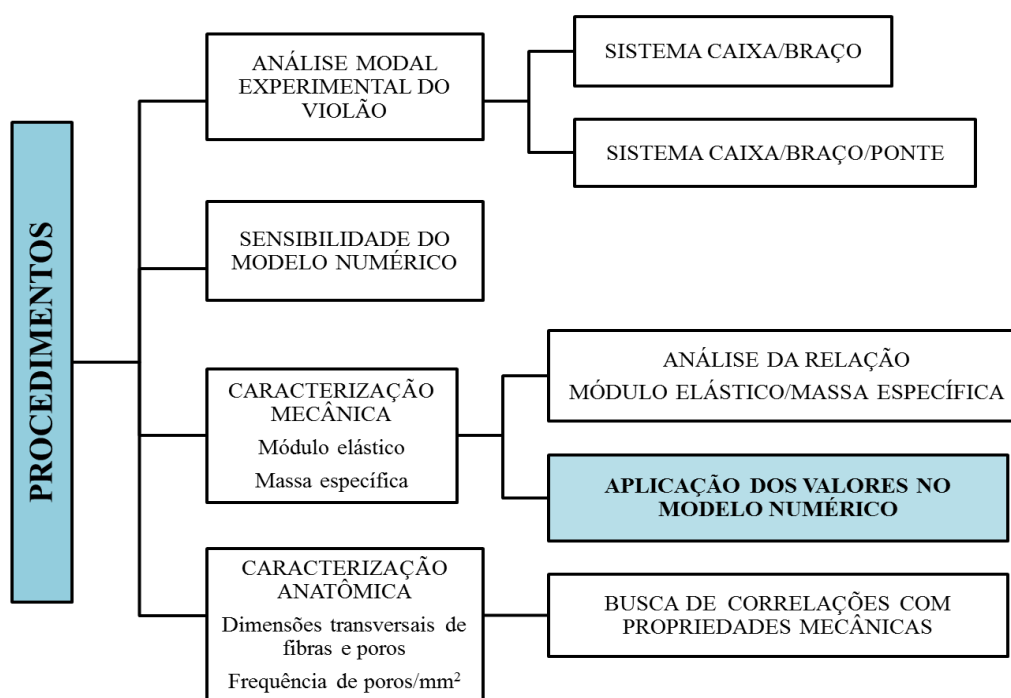
	<b>Baixo</b>	
	Corpo	alder, maple
	Escala	rosewood, maple
	Braço	maple, mahogany
<b>Tagima</b>	<b>Acústicos</b>	
	Tampo	spruce, cedro, walnut, sapelle, basswood, linden, dio wood
	Escala	Ébano
	fundo e lateral	agathis, sapelle, mahogany, ziricote, cocobolo, blackwalnut, walnut, linden basswood, dio wood
	Braço	okoume, linden
	<b>Guitarra</b>	
	Corpo	<b>marupá</b> , cedro, okoume e basswood, alder, mogno, basswood, poplar
	Escala	<b>pau-ferro</b> , marfim, ébano
	Braço	marfim, maple
	<b>Baixo</b>	
	Corpo	<b>marupá</b> , cedro, basswood, okoume, ash
	Escala	marfim, maple, pau-ferro, rosewood
	Braço	marfim, maple
<b>Takamine</b>	<b>Acústicos</b>	
	Tampo	spruce, cedro
	Escala	ébanos, rosewood
	fundo e lateral	rosewood, maple, ovankol, koawood, sapele
	Braço	mahogany, maple
<b>Clave Sonora</b>	<b>Acústicos</b>	
	Tampo	<b>marupá</b> , pinho pinorá
	Escala	<b>louro canela, louro preto, pau ferro</b>
	fundo e lateral	<b>imbuia, curupixa</b>
	Braço	Cedro
<b>Odery</b>	Bateria	<b>araucária</b> e teca, maple, birch europeu, buginga, spele, nyatoh, basswood, maple, ash
<b>Outros</b>	Corpo de guitarra	<b>freijó, caixeta, muiracatiara</b>

As espécies em negrito são madeiras brasileiras que já têm sido usadas no setor. Isto confirma a empregabilidade de madeiras brasileiras para fabricação de instrumentos musicais de qualidade.

### 3 – DESENVOLVIMENTO

Tendo como objetivo principal conhecer a resposta vibroacústica do violão diante do uso de madeiras amazônicas em sua construção, realizaram-se análises modais experimentais do violão construído pelo luthier Barros em duas etapas de confecção do instrumento (caixa de ressonância com braço e caixa com braço e ponte), estudos da sensibilidade da resposta modal do modelo numérico da caixa de ressonância (cujas características geométricas correspondem à caixa que compõe o violão real), aquisição, amostragem e caracterização mecânica e anatômica das madeiras amazônicas adquiridas para a pesquisa, avaliação da variabilidade das propriedades mecânicas caracterizadas. As propriedades mecânicas mensuradas foram aplicadas ao modelo numérico da caixa de ressonância, e conjuntos de frequências naturais resultantes do emprego de propriedades de madeiras amazônicas e madeiras tradicionais foram comparadas. Adicionalmente, executaram-se procedimentos de avaliação de características anatômicas e da variabilidade de tais características no interior das peças de madeira, e buscou-se também identificar relações entre propriedades mecânicas e os aspectos anatômicos avaliados. O levantamento de mercado também foi realizado com objetivo de se investigar quais espécies não tradicionais são atualmente aplicadas no setor.

Estes procedimentos foram sintetizados e são apresentados no organograma a seguir, com ênfase para o processo de aplicação dos valores do módulo elástico e da massa específica das madeiras amazônicas no modelo numérico.



**Figura 3.1:** Organograma para apresentação dos procedimentos executados no desenvolvimento da tese

### 3.1 – Análise modal experimental do violão

A técnica de excitação por impulso, apresentada no item 2.1.4.2, foi aplicada para aquisição do conjunto de frequências naturais do sistema em estudo. Para o processo de caracterização do módulo elástico, o corpo de prova é padronizado e, a partir das dimensões, da frequência fundamental e da massa específica, o módulo é calculado, mas no caso em questão, somente o conjunto de frequências fundamentais do sistema é requisitado. A estrutura foi analisada em duas etapas de construção: anexação do braço à caixa de ressonância e anexação da ponte ao sistema caixa/braço. Escolheram-se pontos para aplicação dos impulsos segundo procedimentos adotados por Ribeiro (2014) (Fig. 3.2). O violão ficou suspenso pela mão (componente do braço) por meio de corda elástica para

evitar interferências da estrutura de suporte sobre o sistema em análise e de modo a minimizar restrições à vibração; impactos de curta duração foram efetuados com potência suficiente apenas para produzir um sinal sonoro cuja amplitude pudesse ser captada sem gerar movimentos de corpo rígido. O sensor de captação do sinal foi mantido direcionado perpendicularmente à região central do bojo inferior (correspondente ao centro da ponte). Cerca de sete impulsos foram aplicados a cada ponto marcado no tampo, totalizando 56 espectros de frequência e, por tratamento estatístico dos dados, obtiveram-se os conjuntos de frequências naturais do violão nas duas etapas de construção descritas. Os resultados desta análise possibilitaram identificar as desvantagens ou perdas de informação ao se adotar o modelo numérico da caixa acústica isolada para avaliação de uso de madeiras amazônicas.

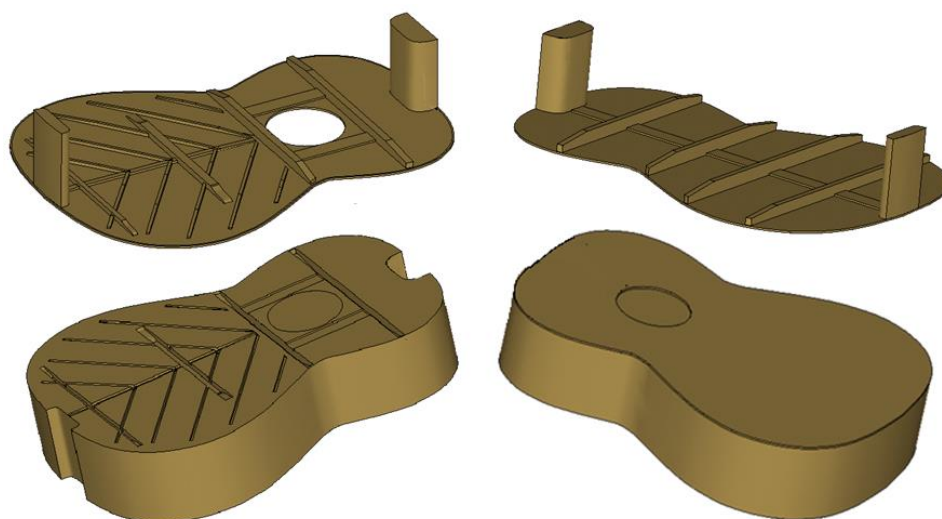


**Figura 3.2:** À esquerda, caixa de ressonância isolada; no meio, violão sem ponte (local de anexação da ponte indicado em laranja); à direita, pontos de aplicação dos impulsos.

### 3.2 – Análise da sensibilidade do modelo numérico

A fase de simulações numéricas foi iniciada com a análise da sensibilidade do modelo numérico de caixa acústica apresentado por Ribeiro (2014) a variações nas

propriedades elásticas e na massa específica das madeiras examinadas no projeto. O objetivo desta análise foi obter informações a respeito do comportamento da estrutura diante de variações nas propriedades do material e, assim, estabelecer previsões sobre a resposta do sistema frente à variabilidade que uma espécie de madeira pode apresentar. Adicionado a isto, verificou-se também a influência das incertezas geradas nos procedimentos de caracterização das madeiras cujas propriedades se deseja inserir no modelo. O modelo em questão (Fig. 3.3) foi desenvolvido com base em uma caixa acústica real, construída pelo luthier Antônio Maurício Barros, que reside, atualmente, em Volta Redonda (interior do estado do Rio de Janeiro). No modelamento do sistema, consideraram-se as placas do tampo harmônico e do fundo, tróculo interno e culatra, travessas e reforços do tampo e do fundo, leque harmônico e o volume de ar enclausurado a partir das dimensões reais do violão. A impossibilidade do emprego de uma abordagem fluido-estrutural impôs a adequação a um modelo puramente estrutural, no qual o volume representante do ar enclausurado recebeu as propriedades do ar. Em lugar das placas laterais e seus reforços, adotou-se como condição de contorno a restrição completa ao movimento da área lateral do volume de ar. Esta restrição tem sido validada por resultados de análises modais experimentais de caixas acústicas reais (Curtu et al. 2009; Richardson 2010, French 2007). Verificaram-se duas desvantagens da abordagem estrutural. Em princípio, a necessidade de se projetar o tampo e o fundo com elementos sólidos levou a um acréscimo considerável no número de graus de liberdade do modelo; além disso, perdeu-se o primeiro modo de vibração, relacionado ao modo  $A_0$  da cavidade de ar (Elejabarrieta et al. 2002, Zaczéski et al. 2018). Porém, o acréscimo no montante de graus de liberdade não gerou aumento significativo no tempo de simulação.



**Figura 3.3:** Modelo numérico projetado

A sensibilidade do modelo foi avaliada variando-se os valores do módulo elástico e da massa específica em 5% e 10%. Considerou-se o modelo ortotrópico, no qual se contabilizam os módulos nas três direções principais de simetria elástica (paralelo às fibras, perpendicular aos anéis de crescimento, tangente aos anéis de crescimento). Simulações foram realizadas para variações em uma única propriedade e em todas as propriedades simultaneamente. Os resultados da análise de sensibilidade forneceram informações sobre a precisão necessária nos métodos de caracterização da madeira.

As propriedades de material aplicadas ao modelo numérico correspondem às madeiras tradicionalmente usadas na construção de violões de alto padrão. Os módulos elásticos longitudinais foram obtidos experimentalmente, via técnica de excitação por impulso, e os demais, necessários à simulação com materiais ortotrópicos, foram calculados a partir de razões disponíveis na literatura. Estas razões relacionam o módulo elástico longitudinal aos demais: módulos elásticos radial e tangencial e módulos de rigidez (Kretschmann 2010; Bodig e Jayne 1993 (apud Ballarin e Nogueira, 2003, p. 71)).



Coefficientes de Poisson determinados por Bodig e Jayne 1993 (apud Ballarin e Nogueira, 2003, p. 71) para folhosas ou coníferas também foram empregados.

**Tabela 3.1:** Propriedades das espécies de madeiras tradicionais aplicadas ao modelo numérico

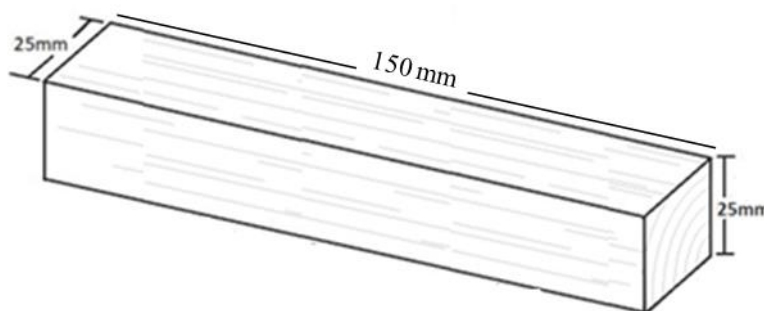
Espécie	abeto	mogno	pinho de riga	jacarandá da bahia
MOE <sub>d</sub> (L) (GPa)	9,25	8,78	17	14,83
MOE <sub>d</sub> (R) (GPa)	1,18	0,97	1,92	0,74
MOE <sub>d</sub> (T) (GPa)	0,55	0,44	1,33	0,46
MOR <sub>d</sub> (LR) (GPa)	1,15	0,77	1,4	1,06
MOR <sub>d</sub> (LT) (GPa)	1,11	0,52	1,38	0,11
MOR <sub>d</sub> (RT) (GPa)	0,09	0,18	0,22	0,01
$\mu_{LR}$	0,42	0,34	0,33	0,37
$\mu_{LT}$	0,46	0,32	0,29	0,5
$\mu_{RT}$	0,53	0,41	0,38	0,67
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	380	500	630	900

As relações empregadas para obtenção dos módulos elásticos transversais e dos módulos de rigidez também foram utilizadas para cálculo dos módulos das madeiras amazônicas.

### 3.3 – Amostragem das madeiras

Peças de três indivíduos arbóreos distintos das espécies Freijó (*Cordia goeldiana*) e cedro rosa (*Cedrela odorata*) foram adquiridas no mercado regional do interior dos estados de S. Paulo e Rio de Janeiro. Como esclarecido anteriormente, para se assegurar que cada peça pertenceria a um indivíduo diferente, consideraram-se três lotes distintos; as peças receberam as designações peça 01, peça 02 e peça 03, de acordo com o lote. Quarenta e oito corpos de prova do Freijó (16 de cada peça), 42 de Cedro rosa (14 - peça 01, 16 - peça

02 e 12 - peça 03), 12 da Muiracatiara (*Astronium lecointei*) e 8 da Maçaranduba (*Manilkara huberi*) foram confeccionados para aquisição do módulo de elasticidade por meio da técnica de excitação por impulso. Os corpos de prova foram preparados conforme a norma ASTM E1876, seguindo-se o sentido paralelo à fibra da madeira para o cálculo do módulo longitudinal. As dimensões adotadas são exemplificadas na figura 3.4.



**Figura 3.4:** Padrão de dimensões do corpo de prova adotado para aquisição do módulo elástico via técnica de excitação por impulso

Para evitar a indução de modos de vibração indesejados, as superfícies dos corpos de prova foram preparadas de forma a diminuir rugosidades. Com este propósito, o lixamento foi mecanicamente realizado com abrasivos P320 a P1000. Ao final do processo de lixamento, as dimensões dos corpos de prova foram mensuradas com paquímetro digital com precisão de  $1 \times 10^{-2}$  mm e a massa foi determinada utilizando-se balança eletrônica digital com precisão de  $1 \times 10^{-2}$  g. Os cp's foram mantidos em sala climatizada com temperatura de  $22 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$  e umidade média relativa de 56% UR por período não inferior a dois meses.



**Figura 3.5:** (A) Politriz utilizada na preparação da superfície dos corpos de prova. (B) Corpos de prova das espécies amazônicas examinadas.

Ao término do processo de caracterização mecânica, uma das extremidades dos corpos de prova foi recortada para análise anatômica em microscópio óptico; no caso do freijó e do cedro, levaram-se em conta apenas as peças de maior variabilidade nos módulos elásticos. Espessuras médias de 7 mm foram adotadas para facilitar o processo de acabamento da superfície. Os métodos geralmente empregados na preparação de amostras de madeira para análise microscópica incluem mecanismos para amolecimento e corte, todavia, a indisponibilidade do equipamento adequado impossibilitou tais procedimentos. Adotou-se, então, o método não usual de preparação da superfície por acabamento com lixa. Após o recorte de extremidades dos corpos de prova com serra manual, efetuou-se lixamento gradativo das amostras com abrasivos P320 a P2500 para que os contornos dos elementos celulares ficassem evidentes.



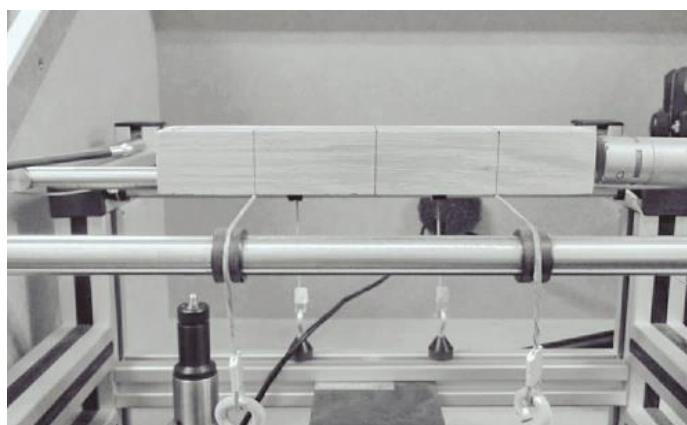
**Figura 3.6:** Amostra de freijó para exame da superfície transversal do corpo de prova

### **3.4 – Caracterização mecânica e análise de variabilidade**

Para aquisição do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal da madeira, os corpos de prova foram recortados segundo a orientação paralela às fibras e a densidade foi mensurada a partir da relação massa/volume. A técnica de excitação por impulso (IET) foi aplicada via sistema Sonelastic® para corpos de prova de tamanho médio (Fig. 3.7). Este sistema compreende um analisador de vibrações, sistema de suporte, sensor acústico e pulsador. Os corpos de prova foram apoiados sobre as cordas tensionadas do sistema de suporte, o sensor acústico foi direcionado a uma das seções transversais do corpo de prova e um impulso leve foi aplicado à extremidade oposta (Fig 3.8). O sinal vibratório emitido pelo corpo de prova ao receber o impulso foi captado e transmitido ao software analisador de vibrações (Lord e Morrel 2006, Otani et al., 2016).



**Figura 3.7:** Sistema Sonelastic para aplicação da técnica de excitação por impulso em corpos de prova de tamanho médio



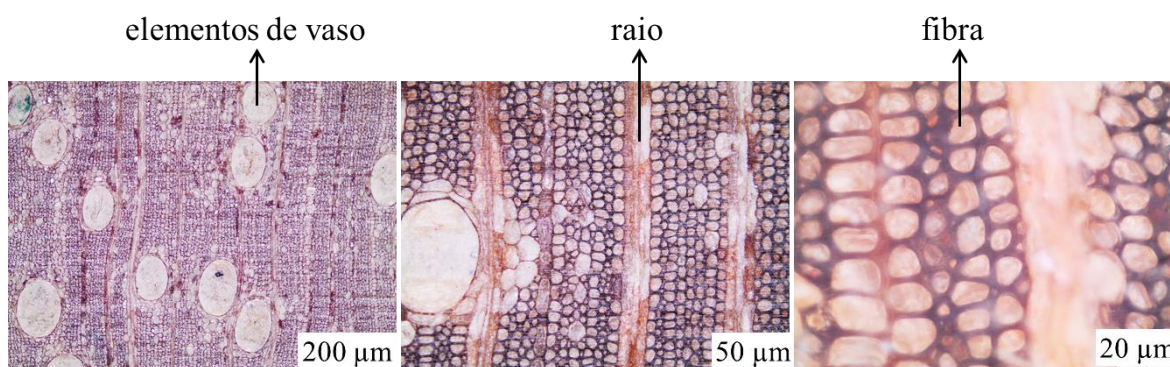
**Figura 3.8:** Posições do corpo de prova e do sensor acústico, e região de aplicação do impulso

Os conjuntos de dados sobre densidade e módulos elásticos receberam tratamento estatístico para análise de variabilidade das propriedades e cálculo de médias a serem empregadas na simulação numérica final.

### 3.5 – Caracterização anatômica e análise de variabilidade

Os procedimentos adotados nesta pesquisa permitiram analisar a grã (Melo et al. 2013), a frequência estatística dos elementos de vaso por amostra, e o diâmetro médio dos

vasos e das fibras. O tipo de grã das quatro espécies foi examinado pela observação a olho nu das superfícies evidenciadas pela partição do corpo de prova no sentido longitudinal, e os elementos celulares foram observados em amostras dos corpos de prova ensaiados mecanicamente. As superfícies das amostras foram preparadas para que os contornos dos elementos celulares ficassem definidos de modo a permitir mensurações, e examinadas através de microscópio óptico para captura de imagens em sete regiões de cada amostra, com aumentos de 50x, 100x, 200x e 500x, de acordo com o elemento celular examinado. O tratamento estatístico foi executado calculando-se média e desvio padrão dentro de cada amostra e para todas as amostras analisadas.



**Figura 3.9:** Elementos e tecidos celulares na madeira

Por análise de regressão, buscaram-se possíveis correlações entre as propriedades anatômicas observadas neste processo e os módulos de elasticidade calculados na fase de caracterização mecânica.

### **3.6 – Aplicação das propriedades de madeiras amazônicas ao modelo numérico**

As médias calculadas a partir dos módulos longitudinais de elasticidade observados para cada espécie foram aplicadas ao modelo numérico de caixa acústica apresentado por

Ribeiro (2014), cuja sensibilidade a variações nas propriedades mecânicas foi avaliada em etapa inicial desta pesquisa. Como os módulos obtidos experimentalmente são longitudinais, foi necessário utilizar as relações entre módulos apresentadas por Kretschmann 2010; Bodig e Jayne 1993 (apud Ballarin e Nogueira, 2003, p. 71) para aquisição dos módulos transversais, e valores para os coeficientes de Poisson fornecidos por Bodig e Jayne (apud Ballarin e Nogueira, 2003, p. 71). Todas estas propriedades são necessárias à análise numérica envolvendo materiais ortotrópicos.

Como a variabilidade das propriedades mecânicas da muiracatiara foi bastante acentuada e a grã se mostrou muito reversa, decidiu-se não aplicar esta espécie ao modelo, deixando esta possibilidade para simulações posteriores. Aplicaram-se, então, os valores do freijó, cedro e maçaranduba considerando duas hipóteses:

- 1 – Freijó no tampo e cedro nas travessas e reforços (nos demais elementos, mantiveram-se os valores das espécies tradicionais).
- 2 – Freijó no tampo, cedro nas travessas e reforços, maçaranduba no fundo (nos demais elementos, mantiveram-se os valores das espécies tradicionais).

**Tabela 3.2:** Propriedades das espécies de madeiras amazônicas aplicadas ao modelo numérico

Espécie	freijó	cedro	maçaranduba
MOE <sub>d</sub> (L) (GPa)	12,27	9,25	19,1
MOE <sub>d</sub> (R) (GPa)	1,89	1,82	0,95
MOE <sub>d</sub> (T) (GPa)	1,006	0,795	0,16
MOR <sub>d</sub> (LR) (GPa)	1,09	1,36	1,36
MOR <sub>d</sub> (LT) (GPa)	0,99	0,9	1,28
MOR <sub>d</sub> (RT) (GPa)	0,26	0,102	0,14
$\mu_{LR}$	0,35	0,39	0,37
$\mu_{LT}$	0,45	0,43	0,50
$\mu_{RT}$	0,56	0,69	0,67
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	568	470	1090

## **4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

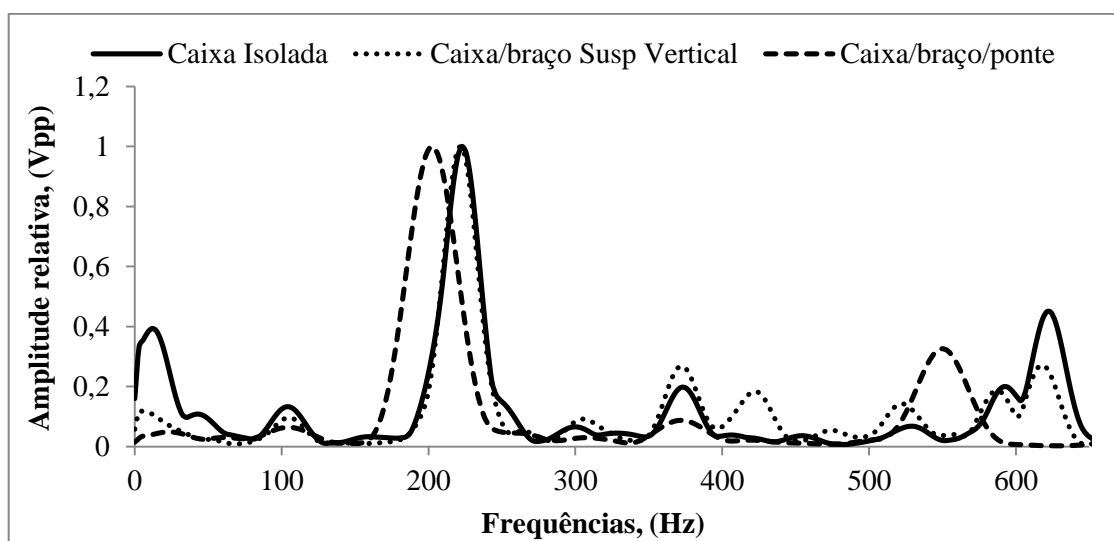
Os resultados e discussões são apresentados de acordo com o organograma inserido no início da seção anterior.

### **4.1 – Frequências naturais dos sistemas acústicos caixa/braço e caixa/braço/ponte**

As análises experimentais modais dos sistemas caixa/braço e caixa/braço/ponte foram realizadas com o objetivo de se examinar as alterações em frequência inseridas no sistema devido à anexação do braço e da ponte, e tais resultados foram utilizados nos procedimentos de avaliação e conclusão relativas à adoção do modelo de caixa acústica isolada, nas etapas de análise numérica; também foram considerados nas tomadas de decisão para as futuras fases da pesquisa.

Para tratamento e apresentação dos dados, consideraram-se frequências inferiores a 650 Hz (Stanciu et al. 2009; French 2007). A figura 4.1 exibe os espectros de frequência obtidos após aplicação de impulso no tampo harmônico da caixa isolada (sem braço e sem ponte), do conjunto caixa/braço e do conjunto caixa/braço/ponte, respectivamente e, de acordo com o ponto de aplicação do impulso, observaram-se variações sutis nos valores de frequência, mesmo ao se considerar um mesmo sistema. Este comportamento exigiu que um tratamento estatístico fosse realizado a fim de que se obtivesse um conjunto de frequências bem definido ao final do processo. Impulsos na região correspondente ao centro da ponte resultaram em espectros com destaque ao pico de frequência entre 202 e 222 Hz, conforme o sistema examinado. Na medida em que se distancia da região central, outras frequências passaram a ser destacadas.



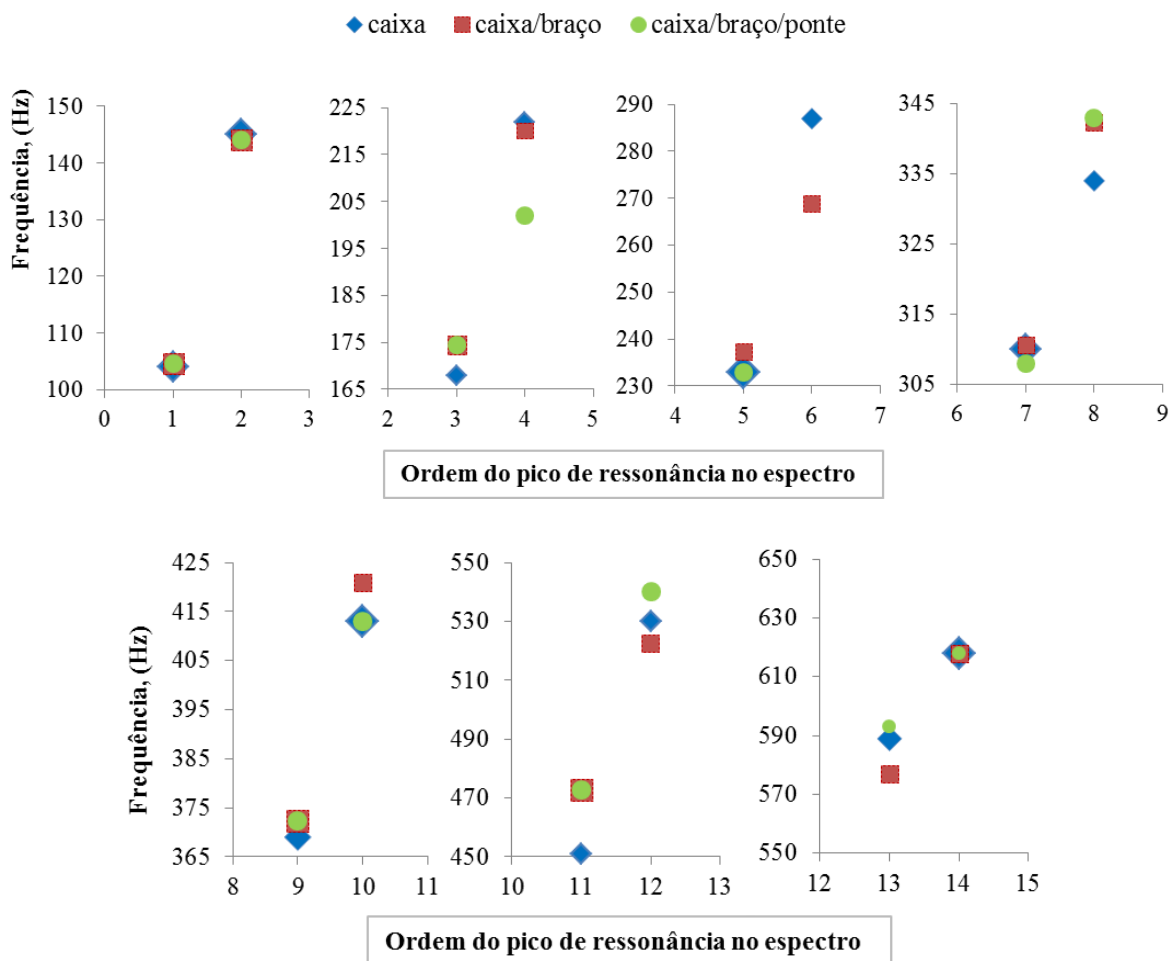


**Figura 4.1:** Espectros de frequências do violão nas etapas de construção examinadas (caixa isolada, caixa/braço e caixa/braço/ponte) após impulso na região central do bojo inferior

O Anexo A contém a tabela geral de dados com as frequências naturais dos sistemas nas etapas analisadas (Tab. A1), e, para melhor exame das alterações no conjunto de frequências, os dados foram plotados em pares (Fig. 4.2); levou-se em conta frequência e pico de ressonância correspondente. Mais uma vez, só foram consideradas as frequências inferiores a 650 Hz.

Os picos 2 e 3 foram detectados pelo software em apenas parte dos testes experimentais, e sempre com baixíssima amplitude. Por isso, o seu papel no espectro real de frequências do sistema ainda não é certo e deverá ser investigado em fases posteriores de pesquisa. Os picos 4, 12, 13 e 14 foram os mais proeminentes (destacando-se o pico 4) e, portanto, podem ser reconhecidos como os mais representativos na resposta modal do sistema nas etapas sem a ponte. A inserção da ponte levou a uma queda mais acentuada nos valores de frequência e imprimiu decréscimo na amplitude da maioria dos picos, exceto para o pico 4, correspondente à frequência 202 Hz. Este é um importante resultado,

pois mostra que, em processos mais próximos da finalização do instrumento, houve a tendência ao destaque de uma única frequência.



**Figura 4.2:** Conjuntos de frequências obtidas com o método de excitação por impulso nas três fases de construção do violão

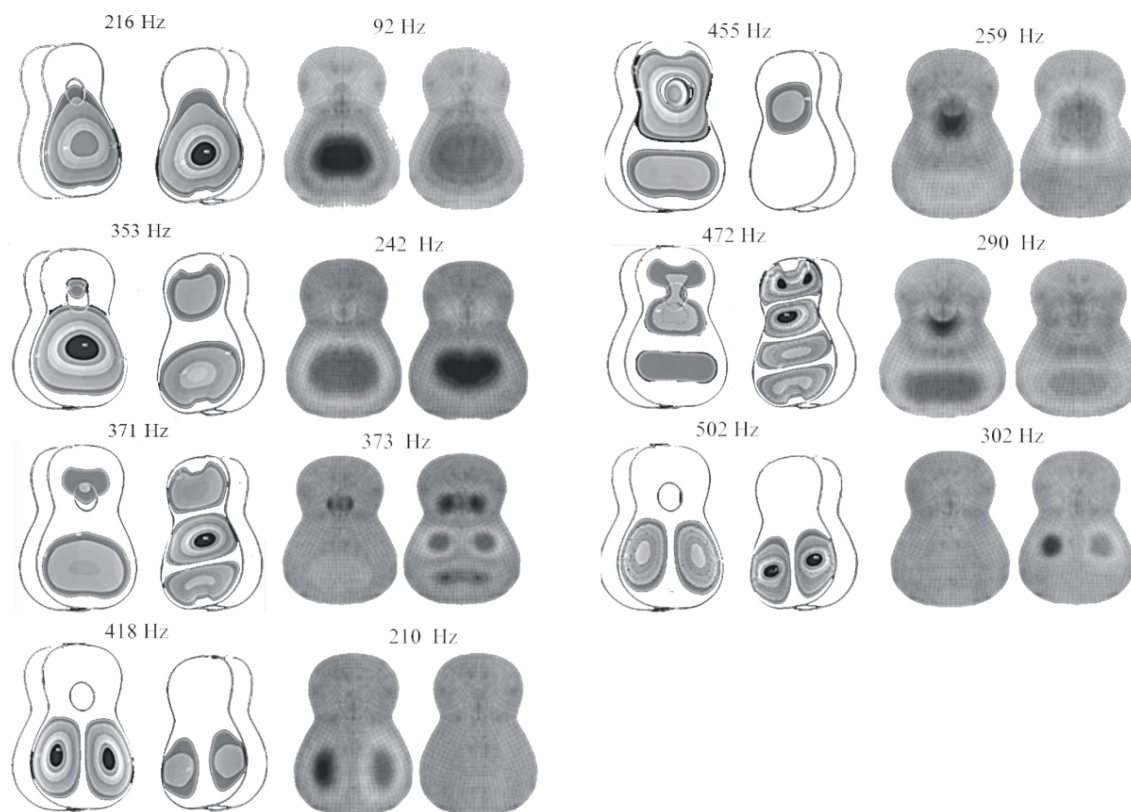
Apesar das diferenças no resultado apresentado pelos sistemas, considerou-se que as tais não descartam a utilização do modelo numérico proposto (caixa de ressonância isolada) e dá indicativos do comportamento esperado com a anexação do braço e da ponte.

## 4.2 – Sensibilidade do modelo numérico

Nesta etapa do trabalho, buscou-se avaliar a sensibilidade do modelo numérico a alterações nas propriedades dos materiais. Os resultados permitiram prever o comportamento acústico do modelo, no que tange os parâmetros modais, ao se aplicar as propriedades das madeiras amazônicas que se propôs avaliar. Ele também possibilita a determinação da resposta frente à variabilidade naturalmente apresentada pela madeira, quanto às propriedades mecânicas, e dentro das limitações da pesquisa.

Foram adotados seis procedimentos de variação com o acréscimo de 5% e 10% no valor apenas do módulo elástico, apenas da massa específica e no valor do módulo e da massa específica simultaneamente, e a análise dos resultados foi realizada em termos das alterações nas frequências e nos modos de vibração, com base no resultado padrão apresentado por Ribeiro (2014). Nas tabelas e gráficos, o termo “padrão” é largamente utilizado para designar os resultados da simulação sem alterações nas propriedades mecânicas.

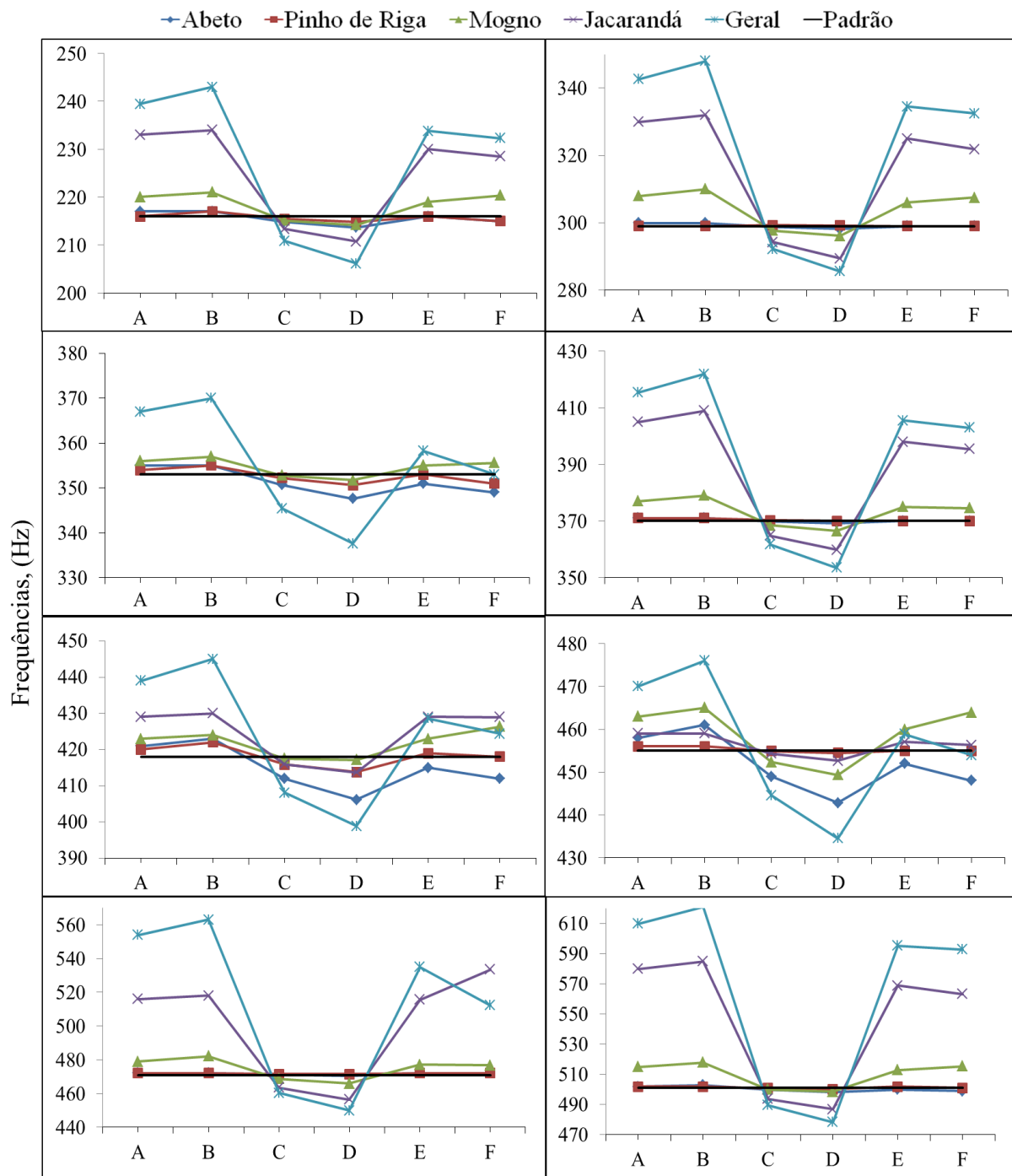
Não foi possível aplicar métodos experimentais para validação dos modos de vibração obtidos na simulação, por isso, utilizaram-se os resultados de Elejabarrieta et al. 2002, sendo ambos exibidos na figura 4.3. Quanto maior a complexidade dos modos de vibração, menor a amplitude desenvolvida pelo sistema, por isso, as pesquisas que envolvem comportamento vibroacústico de violões limitam-se, geralmente, a apresentar de seis a oito dos primeiros modos de vibração, o que impossibilita a validação dos modos mais complexos, por este meio.



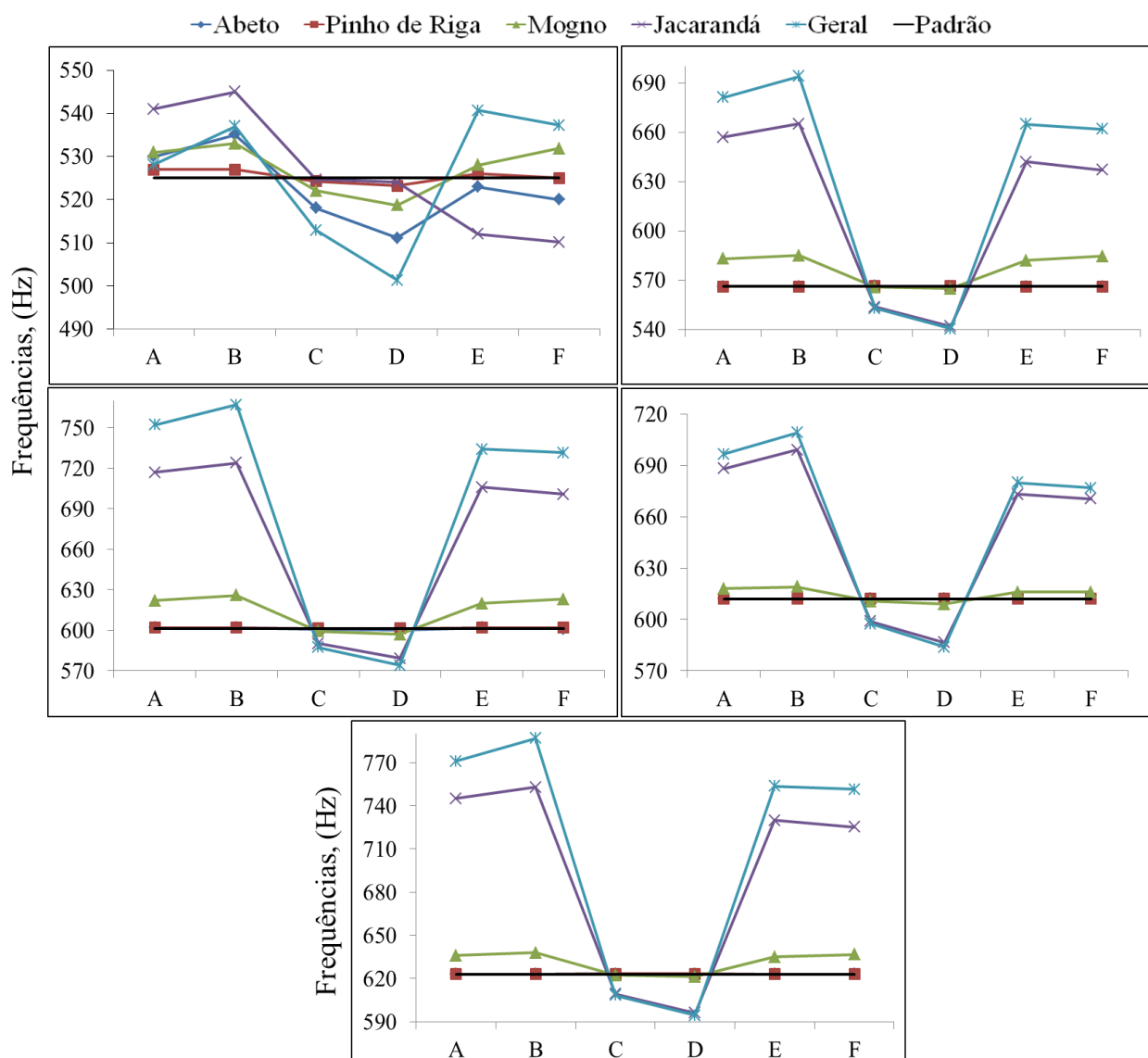
**Figura 4.3:** Primeira e terceira colunas – modos de vibração observados na análise numérica da tese; segunda e quarta colunas – modos apresentados por Elejabarrieta 2002

Observou-se que as alterações não inseriram mudanças expressivas nos modos, mas, em casos específicos, nas frequências desses modos. Nota-se a falta do primeiro modo de vibração relacionado ao modo  $A_0$  da caixa acústica, por vezes referenciado como modo de Helmholtz (French 2007). Como citado anteriormente, a falta deste modo parece ser consequência da abordagem puramente estrutural adotada, em lugar da análise de acoplamento fluido-estrutura. No entanto, o conjunto de frequências naturais do modelo se apresentou razoavelmente próximo do conjunto obtido para a estrutura real.

As figuras 4.4 e 4.5 exibem as alterações em frequência resultantes das variações nas propriedades (até 650 Hz do modelo padrão); é possível observar a relevância do componente estrutural na resposta natural em frequência do sistema.



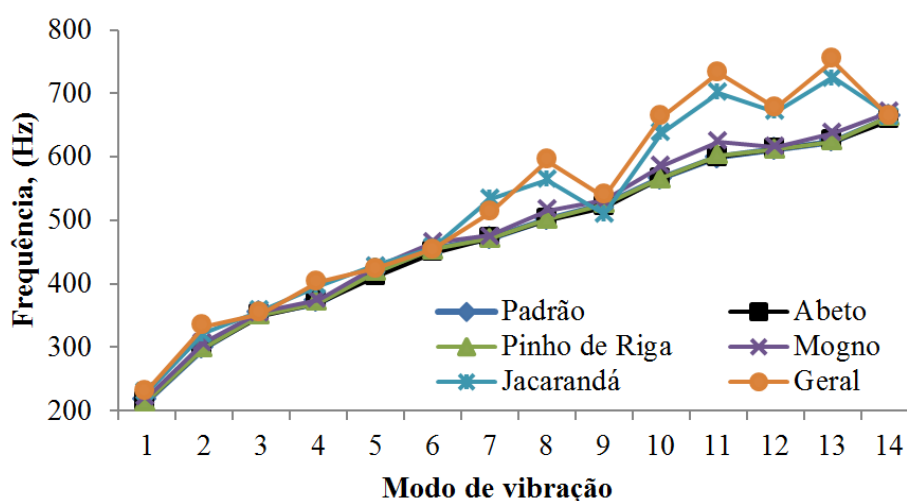
**Figura 4.4:** Alterações nas frequências dos oito primeiros modos de vibração, apresentadas na simulação numérica após variações no módulo de elasticidade e/ou na massa específica (A – 5% no MOE<sub>d</sub>; B – 10% no MOE<sub>d</sub>; C – 5% na massa específica; D – 10% no massa específica; E – 5% no MOE<sub>d</sub> e na massa específica; F – 10% no MOE<sub>d</sub> e na massa específica)



**Figura 4.5:** Alterações nas frequências dos modos de vibração 9º a 13º, apresentadas na simulação numérica após variações no módulo de elasticidade e/ou na massa específica (A – 5% no  $MOE_d$ ; B – 10% no  $MOE_d$ ; C – 5% na massa específica; D – 10% na massa específica; E – 5% no  $MOE_d$  e na massa específica; F – 10% no  $MOE_d$  e na massa específica).

O anexo B contém as tabelas dos conjuntos de frequências naturais referentes a cada variação. As maiores alterações foram observadas quando o valor do jacarandá foi alterado, e, em seguida, com variações no mogno. Diante de acréscimos no  $MOE_d$ , houve aumento na frequência, e acréscimos na massa específica levaram a decréscimos na

frequência. Nos gráficos, só é possível observar alterações em decorrência de acréscimo nas propriedades do abeto e do pinho de Riga para os modos 1, 3, 5, 6 e 9. Levando em conta a representatividade dos dois primeiros modos na resposta acústica do violão, pode-se supor que determinada variabilidade no abeto e no pinho de Riga não acarretariam em alterações significativas na resposta, uma vez que a mudança no valor da frequência se limitou a 2 Hz; o mesmo não se verificou para alterações no jacarandá, chegando a 33 Hz acrescidos no primeiro modo e 18 Hz, no segundo. Na figura 4.6, o conjunto de frequências é apresentado em um único gráfico para que se observem as regiões de maior alteração.



**Figura 4.6:** Conjuntos de frequências apresentadas pelo modelo numérico após variações nas propriedades dos materiais

Apesar da relevância do tempo harmônico na resposta do violão, as alterações de até 10% nas propriedades do abeto e do pinho de Riga não inseriram mudanças representativas na composição de frequências. Isto foi observado tanto com relação ao valor da frequência como aos parâmetros fator de participação, massa efetiva e massa cumulativa, que estimam a influência do modo de vibração na dinâmica do sistema. Por

outro lado, as variações no jacarandá, madeira que compõe a placa do fundo, inseriram alterações expressivas, modificando o conjunto. Apesar da relevância deste resultado, outros casos envolvendo modelos de caixa diferentes deverão ser analisados para que conclusões possam ser extraídas, e é importante destacar que a influência sobre o valor das frequências não tem relação com a amplitude da resposta forçada, uma vez que esta depende, em sua maior parte, do tampo (elemento receptor do impulso).

De forma geral, estes resultados indicam que variabilidades relativamente pequenas nas madeiras pré-selecionadas para o fundo levarão a mudanças significativas no timbre, uma vez que este é direcionado pelas frequências naturais do instrumento.

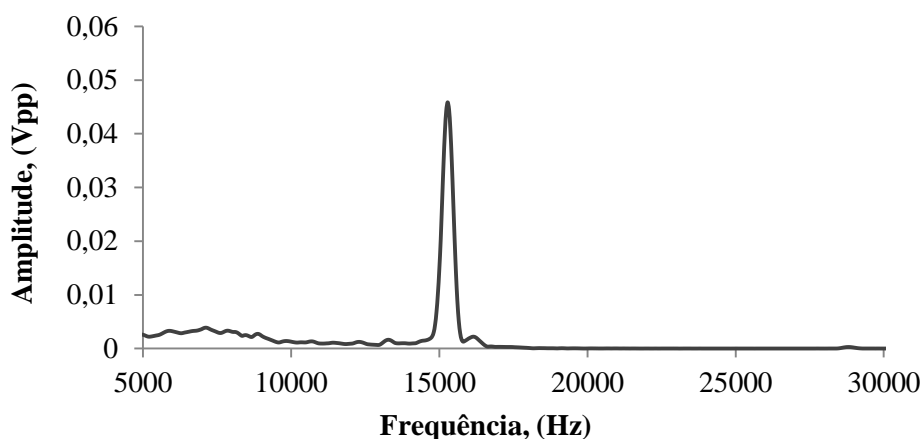
#### **4.3 – Caracterização mecânica e análise de variabilidade**

Os módulos elásticos dinâmicos longitudinais da madeira de Freijó (*Cordia goeldiana*), cedro rosa (*Cedrela odorata*), maçaranduba (*Manilkara huberi*) e muiracatiara (*Astronium lecointei*), obtidos por meio da técnica de excitação por impulso, e as massas específicas, adquiridas a partir da divisão da massa pelo volume do corpo de prova, são apresentados a seguir. Tendo em mãos estes valores, foi possível, a partir das médias, fazer inferências sobre a resposta acústica da caixa de ressonância ao se aplicar estes materiais ao modelo numérico adotado na pesquisa. Também, a partir dos dados referentes à variabilidade, estimativas sobre sua influência foram executadas. Na etapa de aquisição dos módulos elásticos, para as espécies freijó e cedro rosa, foi possível realizar comparações entre peças de três indivíduos arbóreos diferentes; estas receberam as designações peça 01, peça 02 e peça 03. Por outro lado, para as espécies maçaranduba e muiracatiara, apenas uma peça foi avaliada; diante disso, optou-se por apresentar os



resultados destas espécies simultaneamente, o que também possibilitou a comparação entre elas. Os termos ME e  $MOE_d$  foram atribuídos à massa específica e ao módulo elástico dinâmico longitudinal para apresentação dos resultados.

A figura 4.7 exhibe o espectro apresentado em um dos ensaios realizados e que é similar a todos os espectros obtidos neste processo de caracterização, sendo composto por um único pico de alta frequência, característico da geometria do corpo de prova e do modo de vibração induzido com o impulso. Este comportamento está de acordo com o estabelecido por Lord e Morrel (2006) para este tipo de ensaio (técnica de excitação por impulso). Os autores afirmam que a frequência do modo longitudinal deve ser cerca de 4x maior que a frequência do modo flexional, o que foi observado nos ensaios. Esta constatação sugere que a preparação dos corpos de prova foi adequada e que os ensaios foram corretamente executados.



**Figura 4.7:** Frequência fundamental extraída do teste de vibração em amostra da peça 01 do freijó

#### 4.3.1 – Freijó

A frequência fundamental detectada pelo software foi usada para o cálculo do módulo elástico; volume e massa dos corpos de prova foram usados na obtenção da massa

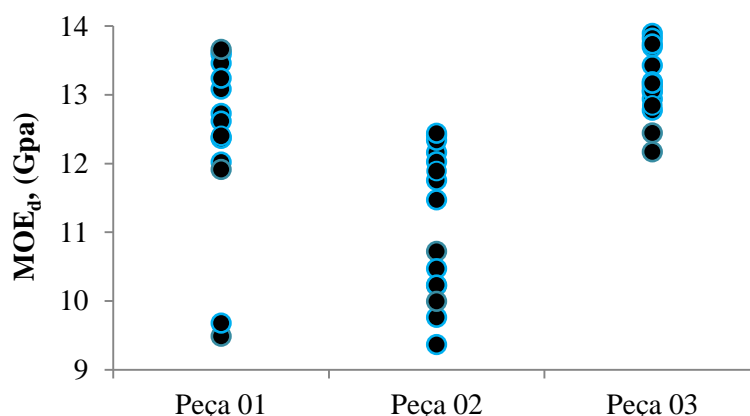
específica. A tabela C.1 do anexo C apresenta os dados gerais observados e a tabela 4.1 exhibe as médias e desvios das duas propriedades para as três peças de madeira.

**Tabela 4.1:** Propriedades do freijó

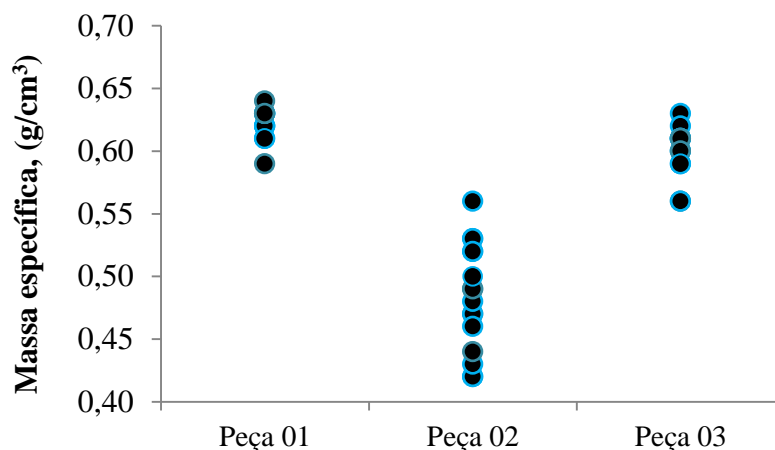
	Piec 01		Piec 02		Piec 03	
	ME(g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)
Mínimo	0,59	9,5	0,42	9,4	0,56	12,2
Máximo	0,64	13,7	0,56	12,4	0,63	14,2
Média	0,62	12,4	0,48	11,2	0,60	13,2
Desvio padrão	0,01	1,24	0,04	1,05	0,02	0,55
C.V.	2%	10%	9%	9%	3%	4%

As figuras 4.8 a 4.13 exibem os padrões de distribuição observados em cada peça quanto ao módulo e à massa específica e/ou o tipo de correlação entre estas grandezas. Os resultados são apresentados para os dezesseis corpos de prova de cada peça de freijó.

No geral, os módulos apresentaram maior variabilidade que a massa específica, o que está em conformidade com os resultados de Targa et al. 2005. A peça 03 exibiu a menor variabilidade no módulo elástico, com valores entre 12 e 14 GPa, portanto, uma variação geral de 2 GPa; este comportamento é enfatizado pelo desvio padrão e pelo C.V. (0,55 GPa e 4%, respectivamente).



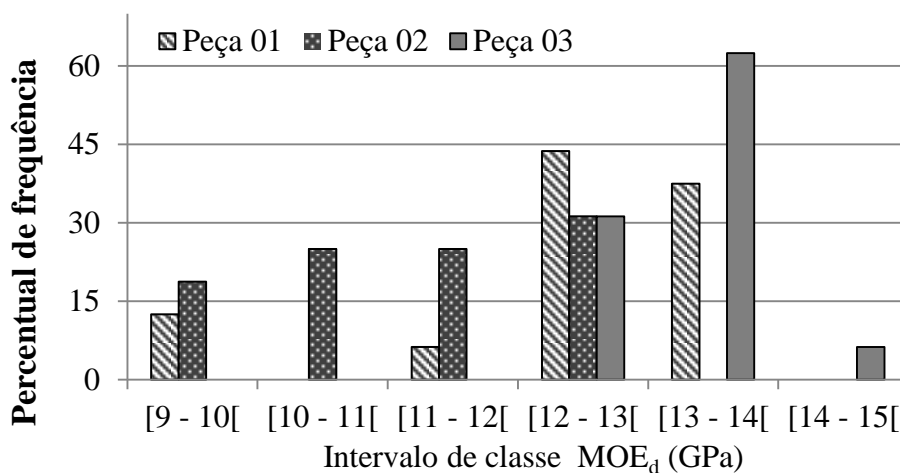
**Figura 4.8:** Distribuição do módulo elástico dos corpos de prova extraídos das peças 01, 02 e 03 do freijó



**Figura 4.9:** Distribuição da massa específica dos corpos de prova extraídos das peças 01, 02 e 03 do freijó

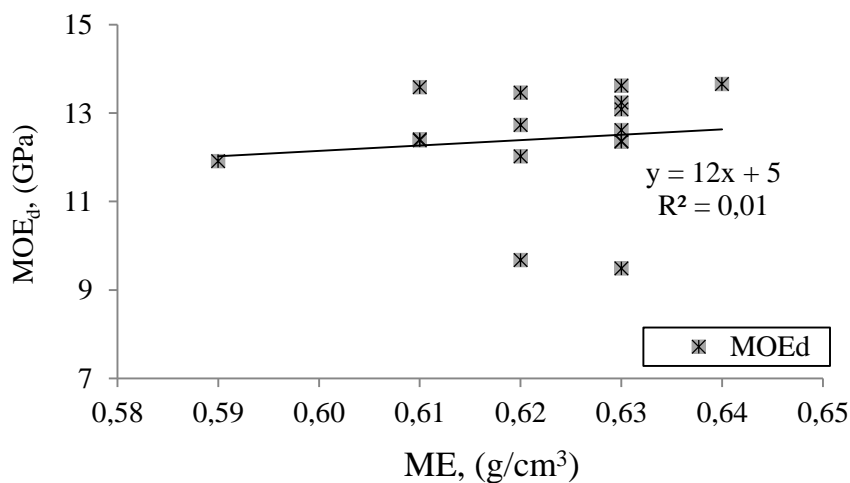
A peça 01 exibiu a maior estabilidade na massa específica e as maiores variações nos módulos, com mínimo e máximo de 9,5 e 13,7 GPa, respectivamente, e amplitude estatística de 4,2 GPa, sendo esta a diferença entre os extremos do conjunto. A estabilidade da massa específica está normalmente relacionada a madeiras que apresentam menor instabilidade dimensional, o que, por sua vez, é uma característica de indivíduos arbóreos de maior idade. O contrário é observado na peça 02, cujas alterações na massa específica alcançaram c.v. de 9%.

No gráfico de colunas da figura 4.10, a distribuição das frequências para as três peças permite observar de modo geral a região de concentração dos valores do módulo. A partir desta figura, observa-se que a maior parte dos corpos de prova apresentaram módulos no intervalo de 12 a 14 GPa; a média geral calculada para o freijó, de 12,3 GPa, se insere neste intervalo. A média geral da massa específica é dada por  $0,57 \text{ g/cm}^3$ . Estes valores foram reservados para posterior inserção nas propriedades da caixa acústica.

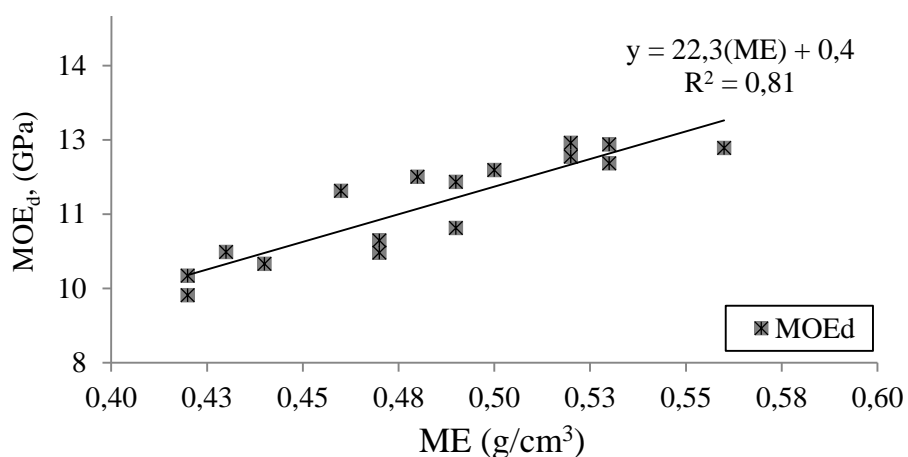


**Figura 4.10:** Frequência relativa dos corpos de prova em intervalos de classe do módulo elástico dinâmico

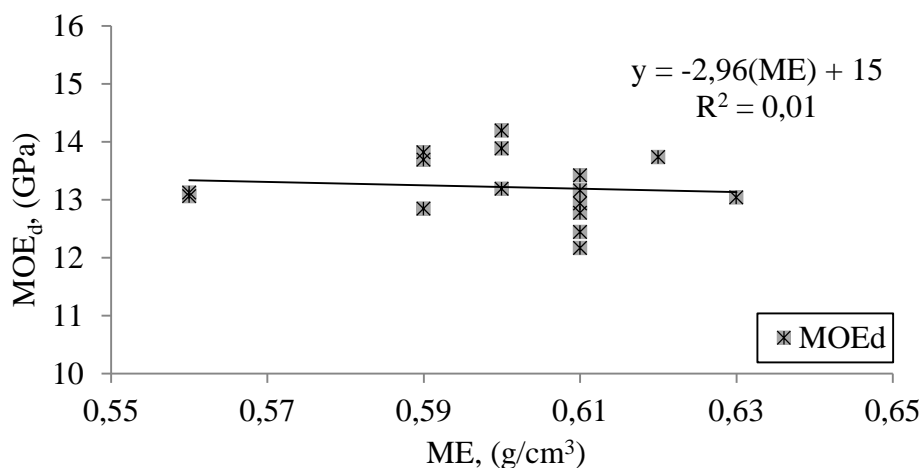
Em geral, espera-se que haja grande correlação entre a massa específica e o módulo elástico de um material, mas, no caso de materiais não isotrópicos, o comportamento se apresenta mais complexo. Para analisar esta correlação, os gráficos de regressão foram gerados com o ajuste de curvas. Estes ratificam o que foi observado nos gráficos anteriores. (Figuras 4.11 a 4.13).



**Figura 4.11:** MOE<sub>d</sub> x massa específica (Peça 01)



**Figura 4.12:** MOE<sub>d</sub> x massa específica (Peça 02)



**Figura 4.13:** MOE<sub>d</sub> x massa específica (Peça 03)

A correlação de Pearson foi calculada e apontou interdependência linear muito fraca, muito forte e muito fraca (com os valores 12% e 90% e 10%) entre o módulo e a massa específica das peças 01, 02 e 03, respectivamente. Apenas para a peça 02, os coeficientes de determinação presentes no gráfico definem adequabilidade do ajuste ao conjunto de pontos e indicam boa correspondência.

A escolha das madeiras para confecção de instrumentos musicais não é aleatória, devendo seguir critérios que fomentem o melhor desenvolvimento da resposta sonora. Por

isso, de maneira geral, o mercado tradicional de madeiras para este fim é especializado e adota padrões específicos de seleção, tratamento e armazenagem. Além disso, luthiers experientes costumam usar um critério de seleção no ato da compra, pelo qual se vislumbra uma característica tímbrica desejada para a peça a ser adquirida; neste, um peteleco é dado na madeira e, por análise empírica auditiva do som emitido, ele escolhe a peça que lhe agrada. Atendo-nos, porém, a um processo de aquisição de madeiras similar ao adotado nesta pesquisa, compra em madeiras não especializadas, pode-se tomar como critério a idade da árvore, considerando que maior idade tende a representar melhor estabilidade (a estabilidade dimensional tem papel fundamental por conferir ao instrumento melhor resistência às mudanças ambientais). Diante disto, é possível considerar as peças 02 e 03 como as mais adequadas ao uso no instrumento porque apresentaram as menores variabilidades. De qualquer forma, diante da sensibilidade do modelo numérico, a variabilidade dessas madeiras podem representar acréscimos de 2 Hz a 4 Hz no primeiro modo, levando em conta o acréscimo de 10 % analisado na seção 4.2.

#### **4.3.2 – Cedro rosa**

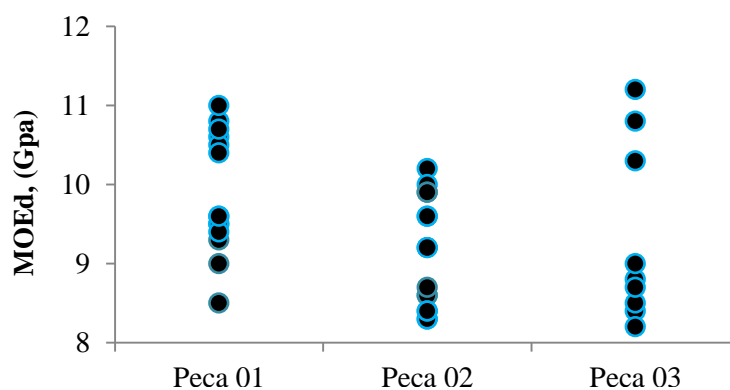
Como explicitado no levantamento de mercado, o cedro tem sido usado para compor o braço de violões e há relatos não acadêmicos sobre a aplicação no tampo e nos reforços. Também, relativamente às propriedades mecânicas e características anatômicas, há vasta literatura que possibilita a retirada de valores necessários a várias pesquisas, porém, para que os objetivos deste trabalho fossem alcançados, foi necessária a análise detalhada dos corpos de prova; os dados de literatura foram utilizados para verificação.

Nesta subseção da tese, os resultados da caracterização do cedro rosa são apresentados. Os picos de ressonância detectados nos testes de excitação por impulso foram utilizados no cálculo do módulo elástico dinâmico, na direção paralela às fibras da madeira. A tabela descritiva dos dados é apresentada no Anexo C (Tab. C.2) e a tabela 4.2 apresenta médias, desvios e coeficientes de variação para as três peças de cedro rosa.

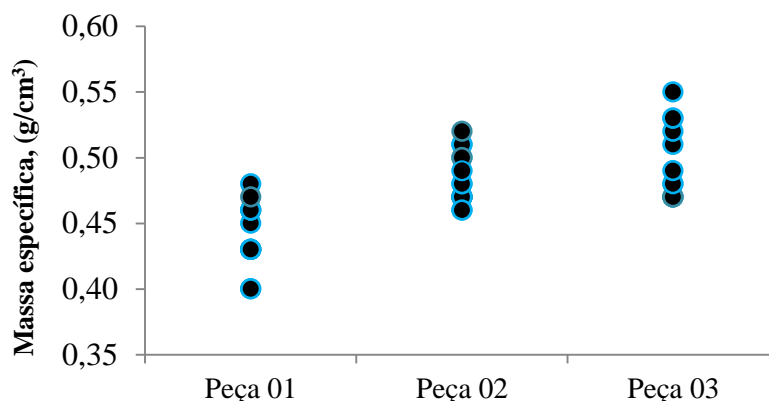
**Tabela 4.2:** Propriedades do cedro

	Peça 01		Peça 02		Peça 03	
	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)
Mínimo	0,40	8,5	0,46	0,83	0,47	6,4
Máximo	0,48	11	0,52	10,2	0,55	11,2
Média	0,44	9,9	0,48	9,1	0,5	8,7
Desvio padrão	0,02	0,74	0,02	0,66	0,03	1,40
C.V.	5,3%	7,4%	3,9%	7,3%	5,6%	16,0%

Dentre as quatro espécies estudadas, o cedro rosa é a de menor massa específica. Esta característica o torna fácil de aplainar, serrar, lixar, furar, pregar, colar e tornear, contudo, exige cuidados na preparação das superfícies, especialmente das amostras para análise microscópica. O coeficiente de variação mostra que, no MOE<sub>d</sub> as variabilidades das peças 01 e 02 foram semelhantes e mais baixas, a peça 03 exibiu variabilidade muito superior, o que se verifica por meio dos desvios e coeficientes de variação dos conjuntos dados. Todas as peças apresentaram boa estabilidade para a massa específica, exibindo desvios inferiores a 0,04 g/cm<sup>3</sup>. As figuras 4.14 e 4.15 exibem a distribuição do MOE<sub>d</sub> e da massa específica, respectivamente e as figuras 4.17 a 4.19, o nível de correlação entre as grandezas.



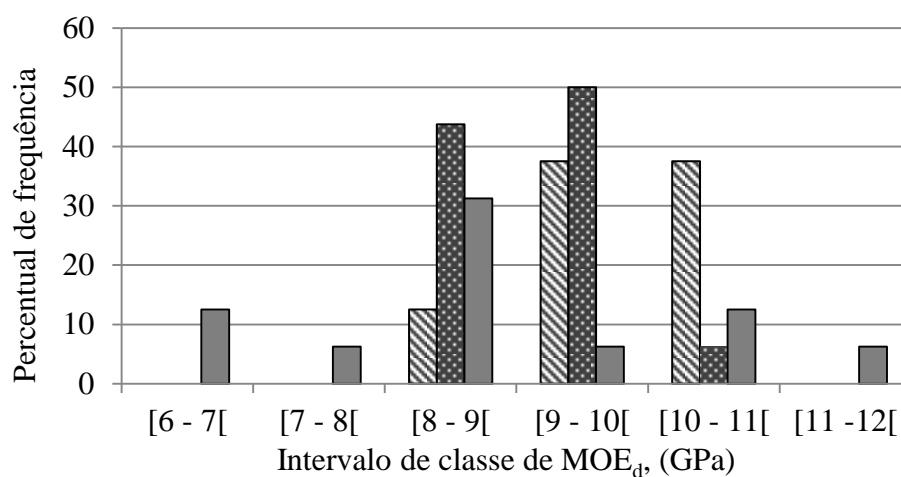
**Figura 4.14:** Distribuição do módulo elástico dos corpos de prova extraídos das peças 01, 02 e 03 do cedro rosa



**Figura 4.15:** Distribuição da massa específica para os corpos de prova extraídos das peças 01, 02 e 03 do cedro rosa

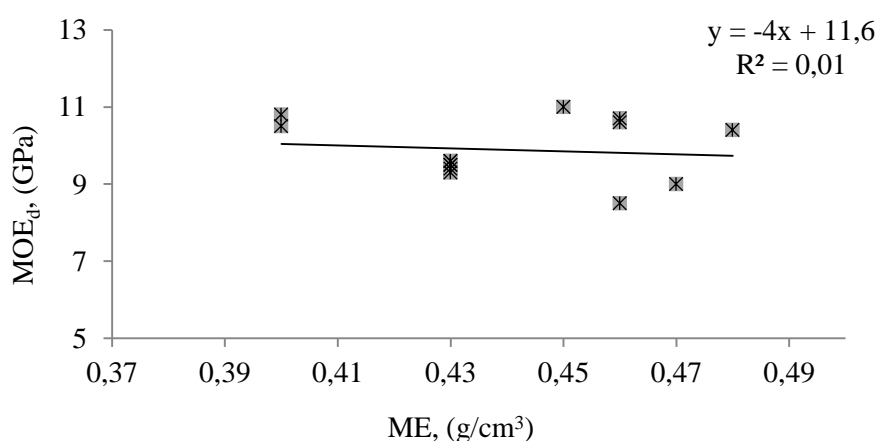
A peça 02 exibiu a menor variabilidade no módulo elástico e na massa específica, com valores entre 8,3 e 10,2 GPa, portanto, uma variação geral de 2,1 GPa; a massa específica variou entre 0,46 e 0,52 g/cm<sup>3</sup>. Quando se observa apenas a massa específica, verifica-se similaridade entre as peças 01 e 03, com amplitudes de conjunto de dados equivalentes de 0,08 g/cm<sup>3</sup>. Pela figura 4.16, verifica-se que um número representativo de corpos de prova apresentou módulos dentro do intervalo de 8,5 a 11 GPa, o que gerou uma média de 9,3 GPa para todo o conjunto amostral de corpos de prova extraídos das peças de cedro rosa.



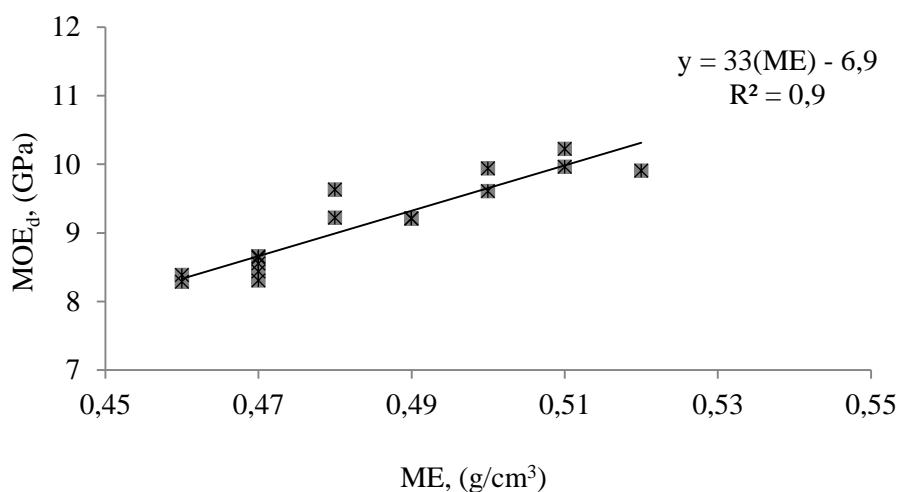


**Figura 4.16:** Frequência relativa dos corpos de prova em intervalos de classe de módulo de elasticidade

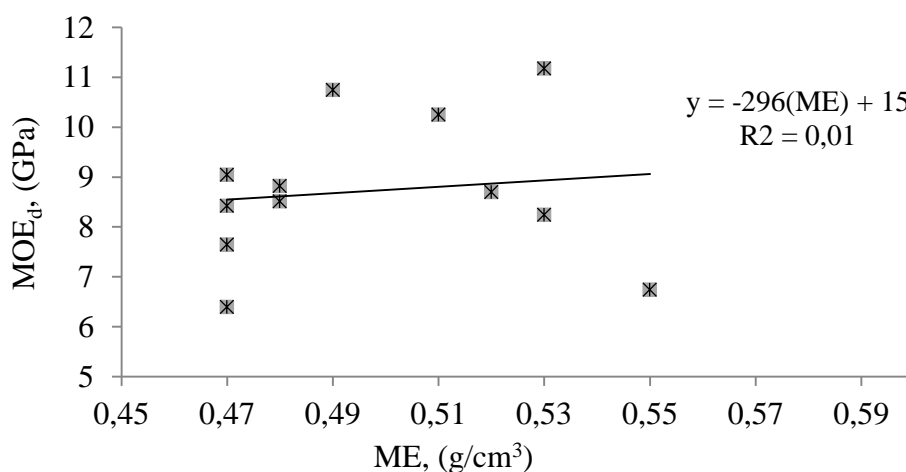
As médias do MOE<sub>d</sub> e da massa específica foram reservados para posterior aplicação na simulação numérica da caixa acústica. As figuras 4.17 a 4.19 apresentam o comportamento obtido na análise de regressão entre o módulo elástico e a massa específica. Como se verifica, cada peça exibe comportamento diferenciado. O  $R^2$ , constante no gráfico, exprime o quanto a linha de regressão se adequa aos dados, portanto, apenas para a peça 02 se observou ótima relação; para as demais, a relação é extremamente pobre.



**Figura 4.17:** MOE<sub>d</sub> x massa específica (Peça 01)



**Figura 4.18:** MOE<sub>d</sub> x massa específica (Peça 02)



**Figura 4.19:** MOE<sub>d</sub> x massa específica (Peça 03)

Os gráficos e os ajustes de curva expressam a dispersão mais acentuada da peça 03. A análise das correlações entre MOE<sub>d</sub> e massa específica identificou correlação muito fraca, muito forte e muito fraca para as peças 01, 02 e 03, respectivamente. A correlação baixa entre as grandezas indica a atuação de outras variáveis na composição das características elásticas da madeira (Lobão et al. 2004).

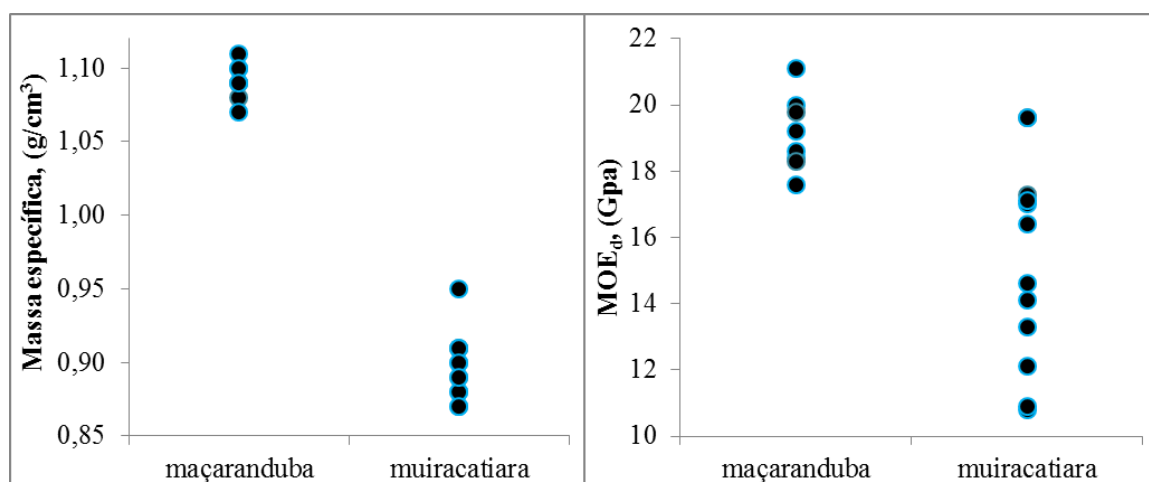
### 4.3.3 – Maçaranduba e da muiracatiara

Para estas espécies, não foi possível adquirir três ou mais peças de diferentes indivíduos arbóreos, assim os resultados correspondem a um único indivíduo; o número de corpos de prova foi também diminuído devido à presença de rachaduras. Os dados obtidos por meio dos ensaios para caracterização dos corpos de prova de maçaranduba e muiracatiara foram reunidos e apresentados juntos. Este procedimento permitiu a comparação entre as duas espécies que, apesar de não terem sido selecionadas para a mesma aplicação no violão (Teles, 2005), são madeiras de alta densidade e apresentam algumas características anatômicas semelhantes. O Anexo C contém a tabela geral de dados relativos a  $MOE_d$  e massa específica (Tab. C.3), e a tabela 4.3 exibe os desvios e coeficientes de variação. Adiante, a figura 4.20 mostra a distribuição do módulo e da massa específica.

**Tabela 4.3:** Propriedades das espécies maçaranduba e muiracatiara

	maçaranduba		muiracatiara	
	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)
Mínimo	1,07	17,6	0,87	10,8
Máximo	1,11	21,1	0,95	19,6
Média	1,09	19,1	0,90	15,2
Desvio padrão	0,01	1,06	0,02	2,94
C.V.	1,1%	5,5%	2,4%	19,3%

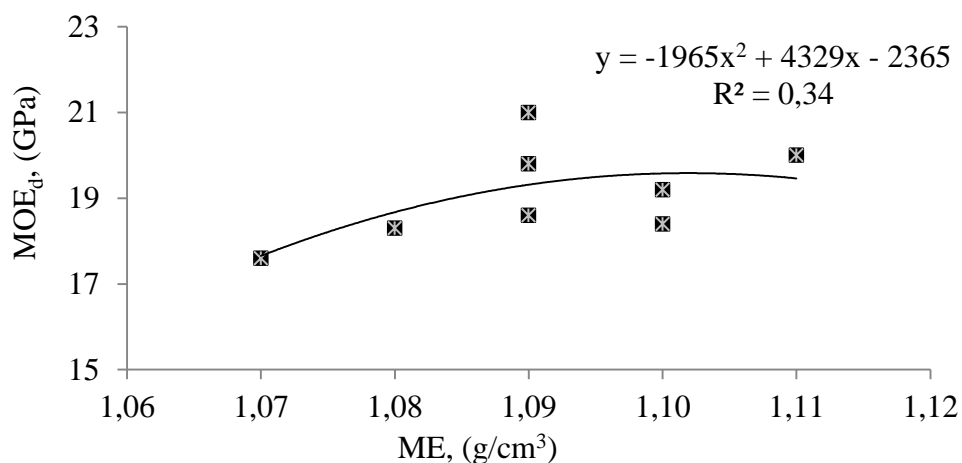
Apesar do número reduzido de corpos de prova, os resultados da maçaranduba mostram boa estabilidade da massa específica, em que se observa variabilidade baixa. A variabilidade nos módulos elásticos foi semelhante a das espécies anteriores, porém, bem inferior à observada para a muiracatiara.



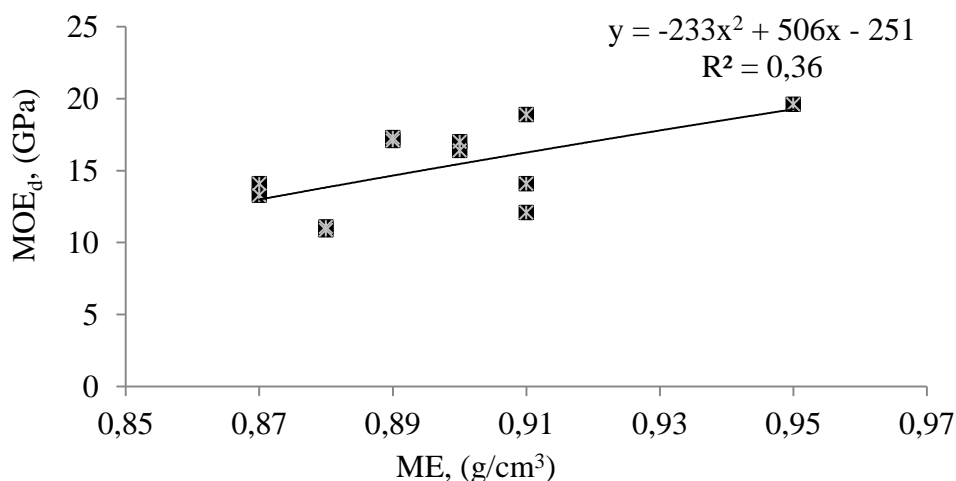
**Figura 4.20:** Distribuição do MOE<sub>d</sub> e da massa específica para as amostras extraídas da maçaranduba e da muiracatiara

As propriedades da maçaranduba se mantiveram em intervalos de 17,6 GPa - 21,1 GPa e 1,07 g/cm<sup>3</sup> - 1,11 g/cm<sup>3</sup>. Para a muiracatiara, obtiveram-se valores 10,8 GPa a 19,6 GPa e 0,87 g/cm<sup>3</sup> a 0,95 g/cm<sup>3</sup>. Esta última espécie apresentou o maior coeficiente de variação (20%) e a maior amplitude para o conjunto de módulos elásticos (8,8 GPa). A despeito disto, as médias encontradas estão de acordo com a literatura, uma vez que o intervalo disponível é significativo e, segundo Targa *et al.* (2005) os coeficientes de variação estão dentro dos limites aceitáveis para ensaios mecânicos (C.V. ≤ 20 %). O nível de variabilidade na muiracatiara é similar ao apresentado por Longui *et al.* (2010).

Assim como nos casos anteriores, a análise de regressão foi aplicada para investigar a correlação entre o MOE<sub>d</sub> e a massa específica. As figuras 4.21 e 4.22 exibem os diagramas de regressão e o ajuste de curvas entre os parâmetros. O ajuste polinomial foi o que mais se adequou ao conjunto de dados, e o coeficiente de determinação definiu a correspondência entre o ajuste e os dados. O coeficiente de Pearson (r) foi calculado identificando correlação linear moderada entre as grandezas (50% e 60% para maçaranduba e muiracatiara, respectivamente).



**Figura 4.21:**  $MOE_d$  x massa específica (maçaranduba)



**Figura 4.22:**  $MOE_d$  x massa específica (muiracatiara)

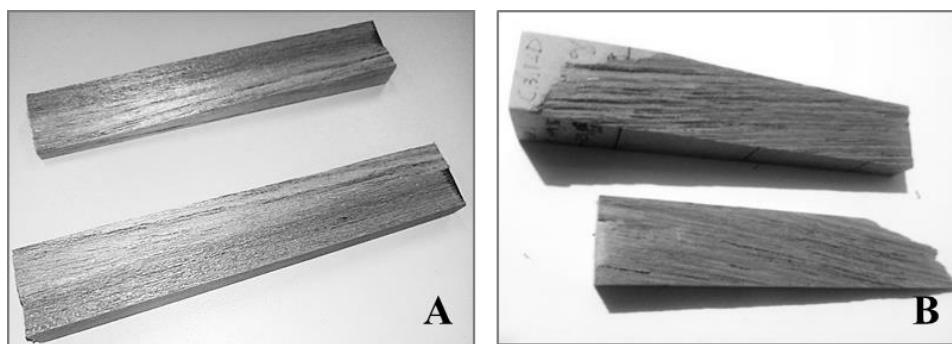
Na fase de inserção dos valores de madeiras amazônicas no modelo de caixa acústica adotado nas simulações, não se utilizaram valores da muiracatiara devido ao alto grau de irregularidade das fibras e à considerável variabilidade nos módulos. Relativamente à maçaranduba, apesar de ter sido pré-selecionada por Teles (2004) para confecção do braço, foi utilizada como teste para o fundo por apresentar alta densidade e grã direita, de modo que suas propriedades foram inseridas no modelo numérico.

#### **4.4 – Análise anatômica e análise de variabilidade**

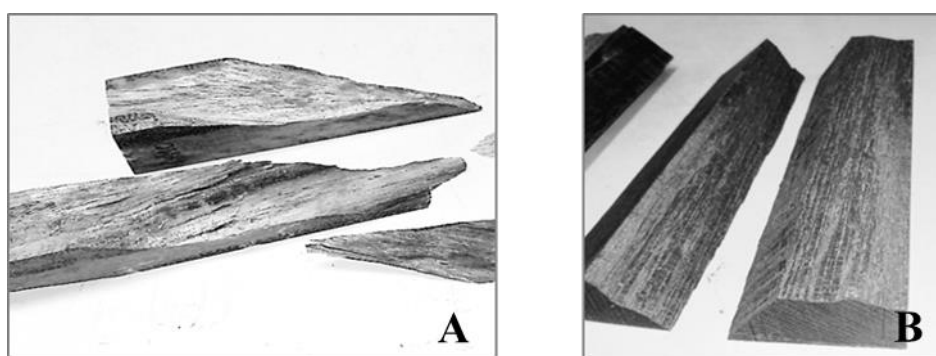
Adicionalmente às etapas voltadas à aquisição e aplicação dos módulos elásticos e massas específicas de madeiras amazônicas, propôs-se analisar a relação entre a variabilidade das propriedades mecânicas e a variabilidade anatômica apresentada pelas espécies, visando estabelecer relações que pudessem, em projeções futuras, ser aplicadas para seleção de madeiras. Com este objetivo, a anatomia foi estudada no que diz respeito aos parâmetros visualizados no corte transversal, ou seja, perpendicular ao comprimento das fibras.

##### **4.4.1 – Grã**

Como primeiro passo na avaliação das características anatômicas, examinou-se o tipo de grã das madeiras. Segundo Carrasco e Mantilla et al., como material altamente anisotrópico, a madeira, tem suas características mecânicas influenciadas por diversos parâmetros, em particular a inclinação de suas fibras. Neste sentido, com o objetivo de determinar o módulo dinâmico de elasticidade em função da inclinação das fibras, Carrasco *et al.* (2017) aplicaram tomografia acústica e identificaram importantes correlações. Na presente pesquisa, no entanto, buscou-se apenas identificar o tipo de grã. Para isto, corpos de prova foram aleatoriamente selecionados e partidos no sentido paralelo às fibras de modo a separá-las. As figuras 4.23 e 4.24 exibem fotografias das superfícies evidenciadas ao se partir os corpos de prova.



**Figura 4.23:** A – grã direita com pequena inclinação visualizada no freijó; B – grã inclinada observada no cedro rosa



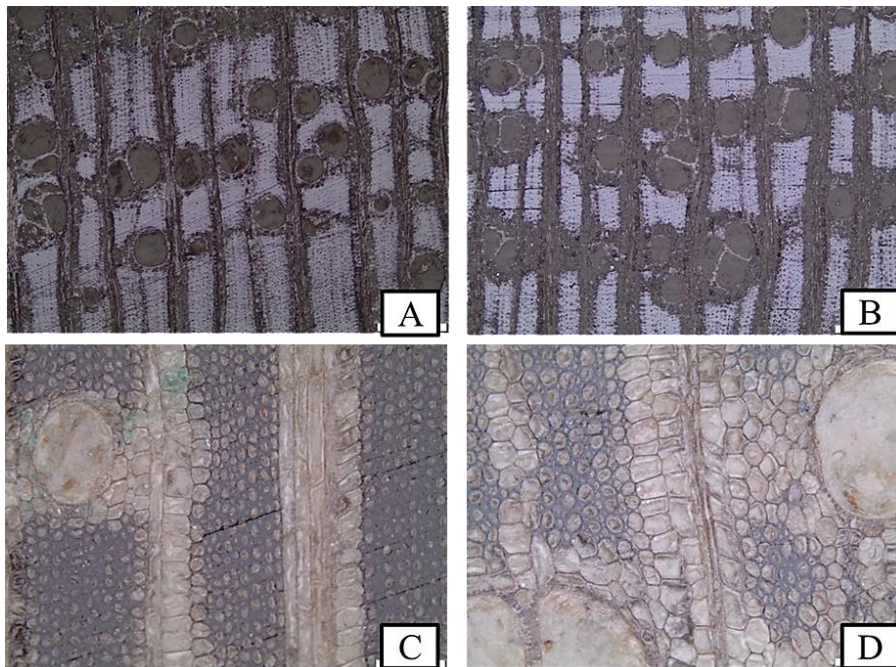
**Figura 4.24:** A – grã revessa na muiracatiara; B - grã direita na maçaranduba

Fazendo-se correspondência entre os resultados obtidos na etapa anterior e as características da grã, é possível pressupor relação entre os módulos elásticos e a inclinação da grã analisada por Carrasco *et al.* (2017).

Quanto aos elementos celulares, geralmente, os parâmetros considerados na análise anatômica englobam diâmetro de poros e fibras, largura do parênquima axial, frequência e fração de poros, fração de parênquima axial e raios medulares, como observado em Marchiori (1992). Na presente pesquisa, consideraram-se os diâmetros de poros e fibras e a frequência dos poros por  $\text{mm}^2$ . Foram analisadas as peças 02 do freijó, 03 do cedro, e as peças de maçaranduba e muiracatiara. Na apresentação dos resultados, o termo *poro* foi aplicado para designar de modo simplificado o elemento de vaso da madeira.

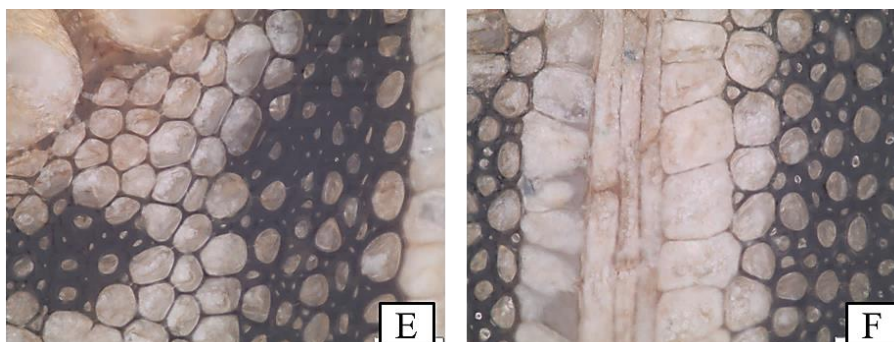
#### 4.4.2 – Anatomia microscópica do freijó

Neste procedimento, foi avaliada a variabilidade nas características anatômicas dos corpos de prova da peça 02. As figuras 4.25 e 4.26 fornece imagens obtidas através de análise em microscópio óptico. É possível observar os poros, o parênquima axial, os raios e as fibras, evidenciados na face transversal da amostra. Apesar do emprego de lixas de granulação muito fina, não foi possível deixar as superfícies transversais do Freijó livres de riscos, o que se visualiza especialmente nas imagens A e B da figura 4.25. Contudo, este defeito não inviabilizou a mensuração dos elementos e dos parâmetros que se projetou avaliar. O Anexo D contém a tabela detalhada de dados por amostra (Tab. D.1). A tabela 4.4 apresenta médias, desvios padrão, coeficientes de variação, mínimos e máximos dos conjuntos.



**Figura 4.25:** Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima (A e B - 50x de aumento; C e D - 200x de aumento)





**Figura 4.26:** Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima (E e F – 500x de aumento)

**Tabela 4.4:** Médias, desvios padrão, coeficientes de variação, mínimos e máximos para os elementos celulares do freijó

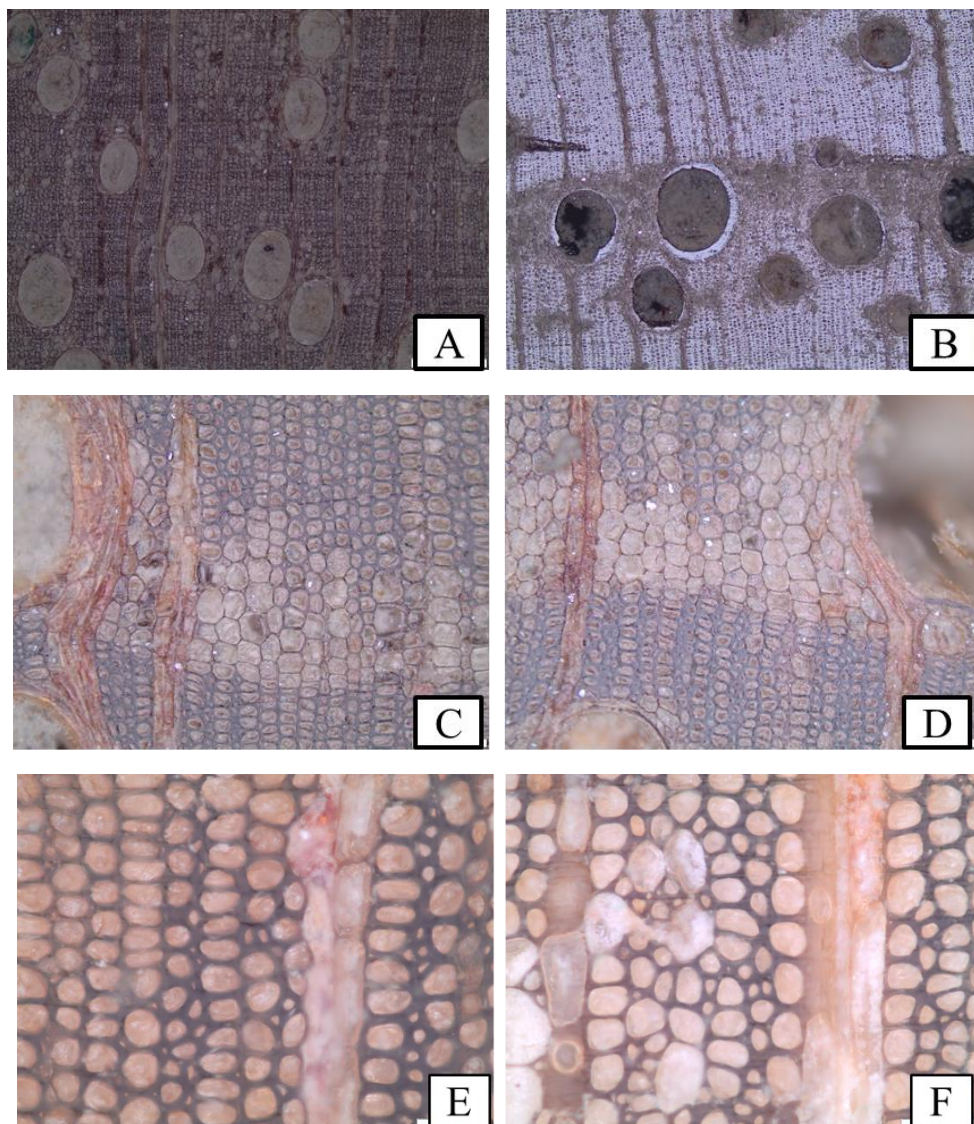
Diâmetro da fibra				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
6,9	2,0	28,7	2,3	16,0
Diâmetro do elemento de vaso				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
105,0	25,3	24,2	24,3	196,2
Elementos de vaso/ $\text{mm}^2$				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
14,5	3,5	23,9	9,4	19,7

O diâmetro médio das fibras para as 16 amostras de freijó se apresentaram entre 2  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ , e o coeficiente de variação geral, em 17%. Para os poros, verificaram-se diâmetros entre 24 e 196  $\mu\text{m}$  e o número de poros por  $\text{mm}^2$  se manteve entre 7 e 21.

#### 4.4.3 – Anatomia microscópica do cedro rosa

Os elementos celulares do cedro se mostraram, em geral, maiores que os elementos do freijó. O diâmetro dos poros, especialmente, apresentou-se, em média, 50% superior. A

figura 4.27 apresenta micrografias de regiões de amostras para aumentos de 50x, 200x e 500x e as imagens A e B, pertencendo a amostras diferentes, permitem visualizar distinção relativamente às dimensões e ao formato da seção transversal dos poros e aos padrões de parênquima axial.



**Figura 4.27:** Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima em amostras de cedro rosa (A e B - 50x de aumento; C e D - 200x de aumento; E e F - 500x de aumento)

A diferença observada no tecido composto pelas fibras entre as imagens A e B da figura 4.27 pode estar relacionada a aspectos da parede celular, mas verifica-se também que a média de diâmetro de fibra calculado para a amostra correspondente à figura A é 0,7  $\mu\text{m}$  inferior à média calculada para a amostra exemplificada na imagem B.

Na tabela D.2, constante no Anexo D, são apresentados os dados gerais para a análise descritiva da anatomia do cedro, e a tabela 4.5 fornece os parâmetros estatísticos de interesse.

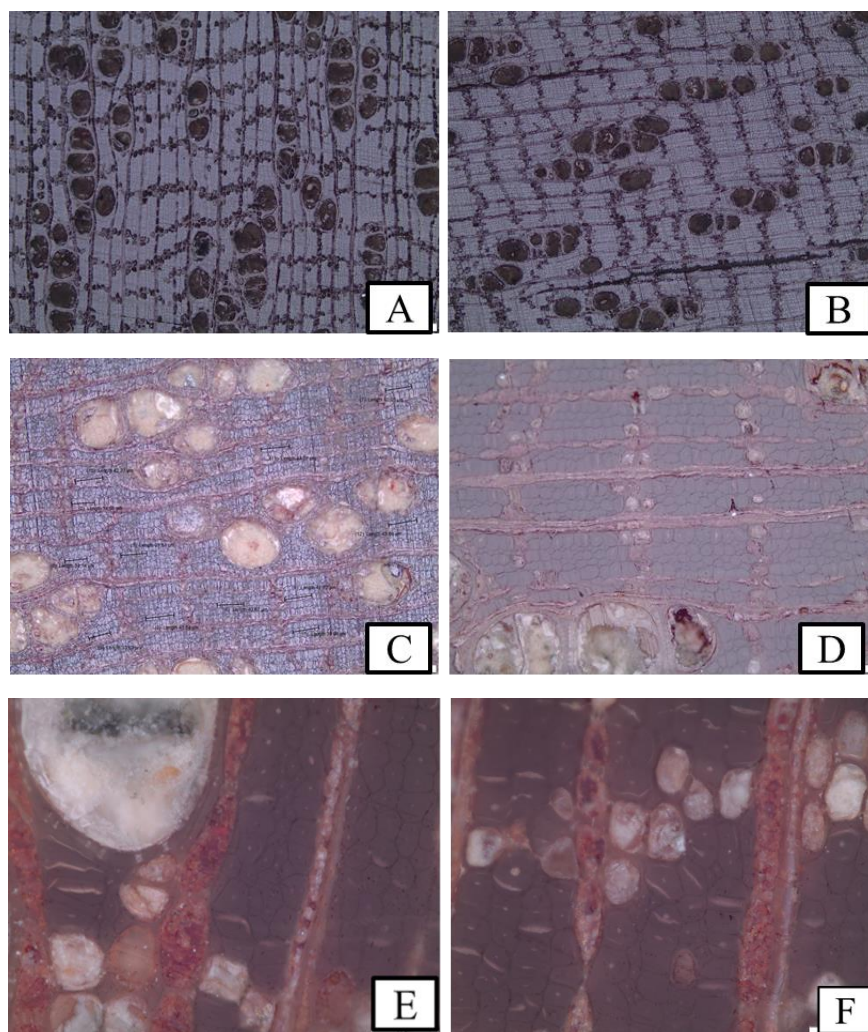
**Tabela 4.5:** Médias, desvios padrão, coeficientes de variação, mínimos e máximos para os elementos celulares do cedro rosa

Diâmetro da fibra				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
8,8	1,9	21,8	4,2	15,7
Diâmetro do elemento de vaso				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
143,6	39,6	27,7	43,5	250,5
Elementos de vaso/ $\text{mm}^2$				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
10,0	1,8	17,8	6,0	15,0

A variabilidade no diâmetro das fibras do cedro se mostrou inferior à variabilidade observada no freijó. Os diâmetros variaram entre 4 e 16  $\mu\text{m}$ , nas fibras, e entre 43 e 251  $\mu\text{m}$  nos poros. A mensuração da espessura da parede das fibras não foi realizada, mas as imagens sugerem que, relativamente às demais espécies examinadas, a parede celular encontra-se menos espessa e o lume (interior dos poros) mais proeminente. O número de poros por  $\text{mm}^2$  variou entre 6 e 15 elementos.

#### 4.4.4 – Anatomia microscópica da maçaranduba

Como madeiras de alta densidade, a muiracatiara e a maçaranduba apresentam algumas semelhanças, contudo, a dureza da maçaranduba proporcionou um melhor acabamento, deixando mais evidentes os contornos dos elementos celulares.



**Figura 4.28:** Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima em amostras de maçaranduba (A e B - 50x de aumento; C e D - 200x de aumento; E e F – 500x de aumento)

A partir das micrografias A e B, na figura 4.28, foi possível verificar que, tanto a frequência dos poros por  $\text{mm}^2$  como o diâmetro deste elementos são significativamente

diversos dos elementos celulares do freijó e do cedro. Os poros são cerca de 4 a 6 vezes mais frequentes e de diâmetro 50% menor. Eles se encontram agrupados formando filas na direção dos raios medulares e se apresentam preenchidos por tilos (expansões das células parenquimáticas adjacentes aos poros que penetram nestes através das pontuações, obstruindo-os parcialmente ou completamente).

Os parâmetros estatísticos calculados para a espécie são exibidos na tabela 4.6 e os dados descritivos por amostra são apresentados na tabela D.3 do Anexo D.

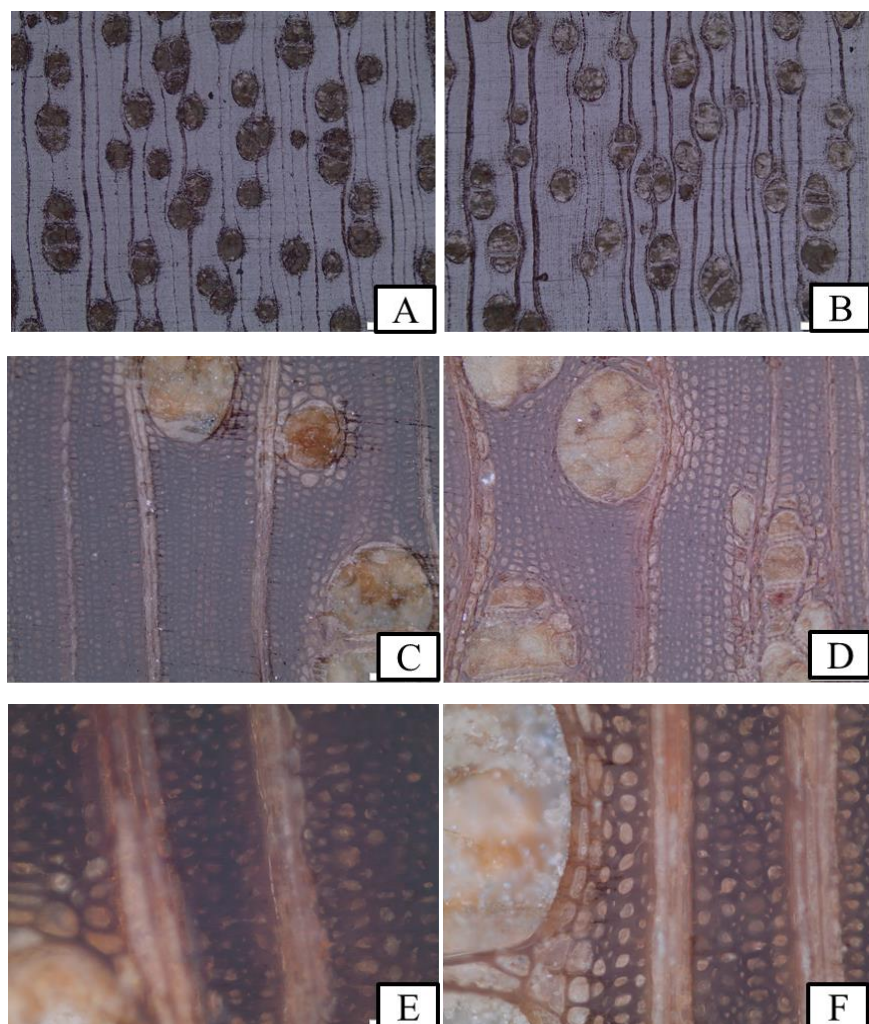
**Tabela 4.6:** Médias, desvios padrão, coeficientes de variação, mínimos e máximos para os elementos celulares da maçaranduba

Diâmetro da fibra				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
7,5	1,2	15,5	4,1	11,2
Diâmetro do elemento de vaso				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
67,3	12,3	18,4	25,1	97
Elementos de vaso/ $\text{mm}^2$				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
45,8	4,6	10,2	31,5	66,1

A maior parte dos coeficientes de variação verificados nas amostras para os três parâmetros analisados ficaram abaixo de 19%. A média para o diâmetro dos poros, o diâmetro médio calculado para a fibra e a frequência dos elementos de vaso correspondem a 67  $\mu\text{m}$ , 7,6  $\mu\text{m}$  e 45 elementos/ $\text{mm}^2$ , respectivamente.

#### 4.4.5 – Anatomia microscópica da muiracatiara

Como consta em documentos de institutos e órgãos florestais, o parênquima axial da muiracatiara é invisível sob lente, porém, no microscópio (a partir de 200x), é possível observar células parenquimáticas no entorno dos poros; seus raios são estreitos e os poros, em boa parte, se apresentam isolados, ou seja, não agrupados.



**Figura 4.29:** Regiões da superfície transversal de um corpo de prova evidenciando o número e diâmetro dos vasos, o diâmetro das fibras, a largura dos raios e a distribuição do parênquima em amostras de muiracatiara (A e B - 50x de aumento; C e D - 200x de aumento; E e F - 500x de aumento)

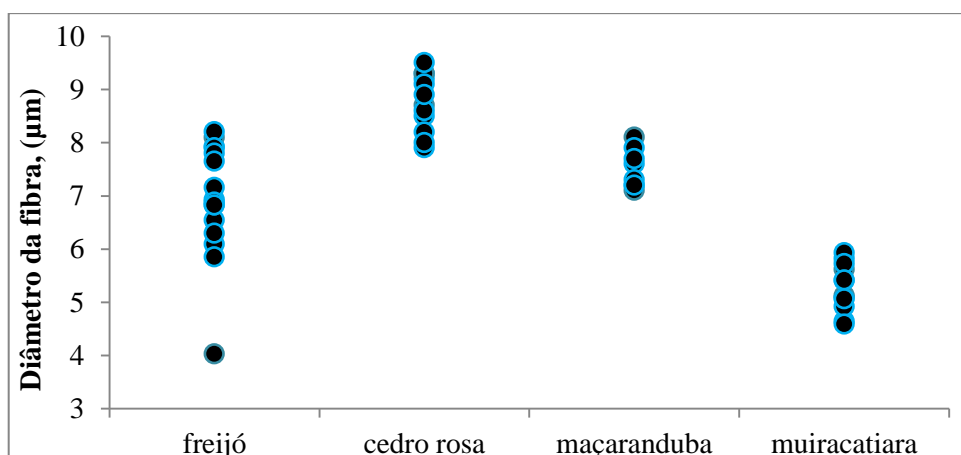
**Tabela 4.7:** Médias, desvios padrão, coeficientes de variação, mínimos e máximos para os elementos celulares da muiracatiara

Diâmetro da fibra				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
5,3	0,9	17,1	2,8	9
Diâmetro do elemento de vaso				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
79,3	15,3	19,3	30,4	142
Elementos de vaso/ $\text{mm}^2$				
Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	c.v. (%)	mínimo ( $\mu\text{m}$ )	máximo ( $\mu\text{m}$ )
25,5	4,2	16,8	11,8	37,0

De modo similar à maçaranduba, o coeficiente de variação dos três parâmetros analisados ficou abaixo de 20%. O diâmetro das fibras variou de 2,8 a 9  $\mu\text{m}$  e dos vasos, de 30 a 142  $\mu\text{m}$ . A frequência dos vasos é bastante inferior à maçaranduba chegando a um máximo de 37 elementos/ $\text{mm}^2$ .

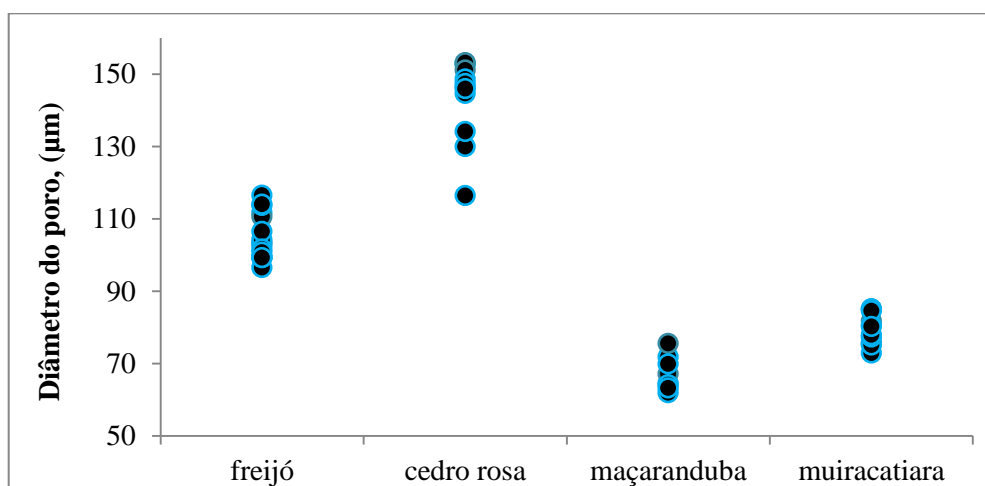
#### 4.4.6 – Análise gráfica e comparação das propriedades anatômicas

As figuras 4.30 a 4.32 exibem os gráficos com a distribuição dos parâmetros para as espécies examinadas. É possível analisar a variabilidade dentro da espécie e entre as espécies.



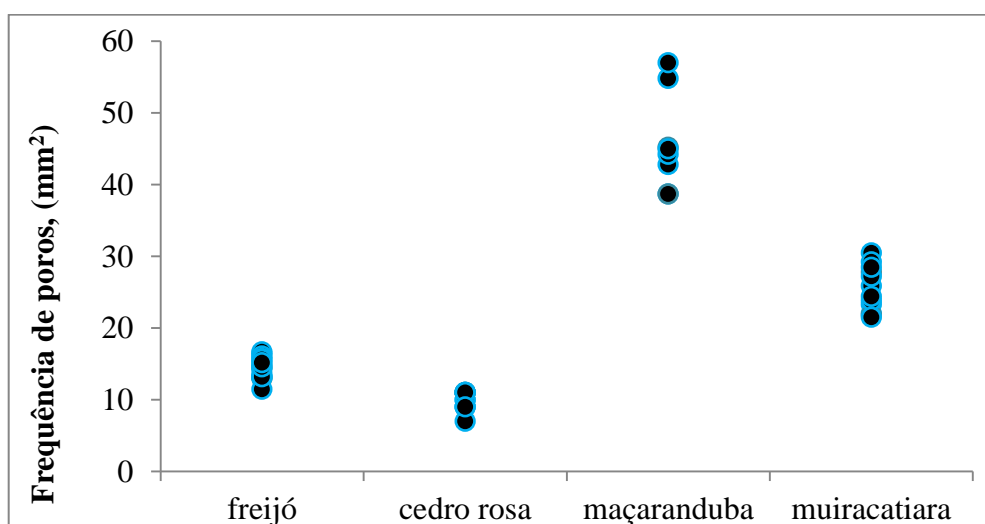
**Figura 4.30:** Distribuição dos diâmetros médios das fibras

O gráfico da figura 4.30 mostra que o cedro apresentou, em média, os maiores diâmetros de fibras. Desprezando o ponto discrepante observado no freijó, a muiracatiara apresenta os menores diâmetros. A maçaranduba apresentou a menor dispersão no parâmetro e o freijó a maior dispersão.



**Figura 4.31:** Distribuição dos diâmetros médios dos poros

Quando a análise é direcionada ao diâmetro de poros (Figura 4.31), observa-se que as madeiras mais leves apresentam diâmetro superior e também maior variabilidade nos valores. Comportamento inverso é evidenciado na maçaranduba e na muiracatiara.



**Figura 4.32:** Distribuição da frequência de poros/mm<sup>2</sup>



Relativamente à frequência dos poros por  $\text{mm}^2$ , pode-se verificar que este parâmetro seguiu a ordem decrescente de densidade, de modo que as madeiras mais densas exibiram maior número de poros. Esta característica poderia não ser esperada porque, a princípio, uma porção maior de poros no tecido lenhoso indicaria menor porção de massa fibrosa, que é o tecido mais denso da madeira, composto de células muito estreitas com parede espessa. Porém, deve-se levar em conta que os diâmetros dos vasos nas espécies de maior densidade são menores e, em grande parte, preenchidos por tilos e por compósitos resultantes da deposição de resinas, taninos e outros substratos. A maçaranduba, em especial, apresenta muitos poros completamente obstruídos e, segundo Burger e Richter (1991), esta deposição também confere resistência à madeira. Estas são observações que poderão ser melhor verificadas por meio de outras análises que permitam examinar a porosidade do material.

Quanto à variabilidade na frequência de poros, o cedro se mostrou bastante estável e a maçaranduba apresentou as maiores variações.

#### **4.5 – Relação entre variabilidade mecânica e variabilidade anatômica**

A análise de regressão multivariada foi realizada para investigação da correlação entre o  $\text{MOE}_d$  e os parâmetros anatômicos observados, para um nível de confiança de 95%, mas não se observaram graus satisfatórios de correlação. De fato, relações lineares não se mostraram adequadas para determinar a dependência entre os parâmetros e, diante disto, ajustes de curvas polinomiais foram testados, mas não se verificou acréscimo significativo nos coeficientes de determinação. A tabela 4.8 fornece os resultados da regressão linear multivariada aplicada aos dados do freijó, exibindo os valores de significância dos

parâmetros e o R quadrado que, na análise multivariada, determina o percentual com que as variáveis juntas determinariam o módulo elástico por meio de relação linear. No Anexo E, são fornecidas as tabelas de regressão múltipla para as demais espécies (Tab. E.1, Tab. E.2 e Tab. E.3).

**Tabela 4.8:** Resultados da análise de regressão multivariada determinando  $MOE_d$  como variável dependente e os parâmetros anatômicos como variáveis independentes (freijó)

<i>Estatística de regressão</i>	
R-Quadrado	16%
Erro padrão	1,073
Observações	16

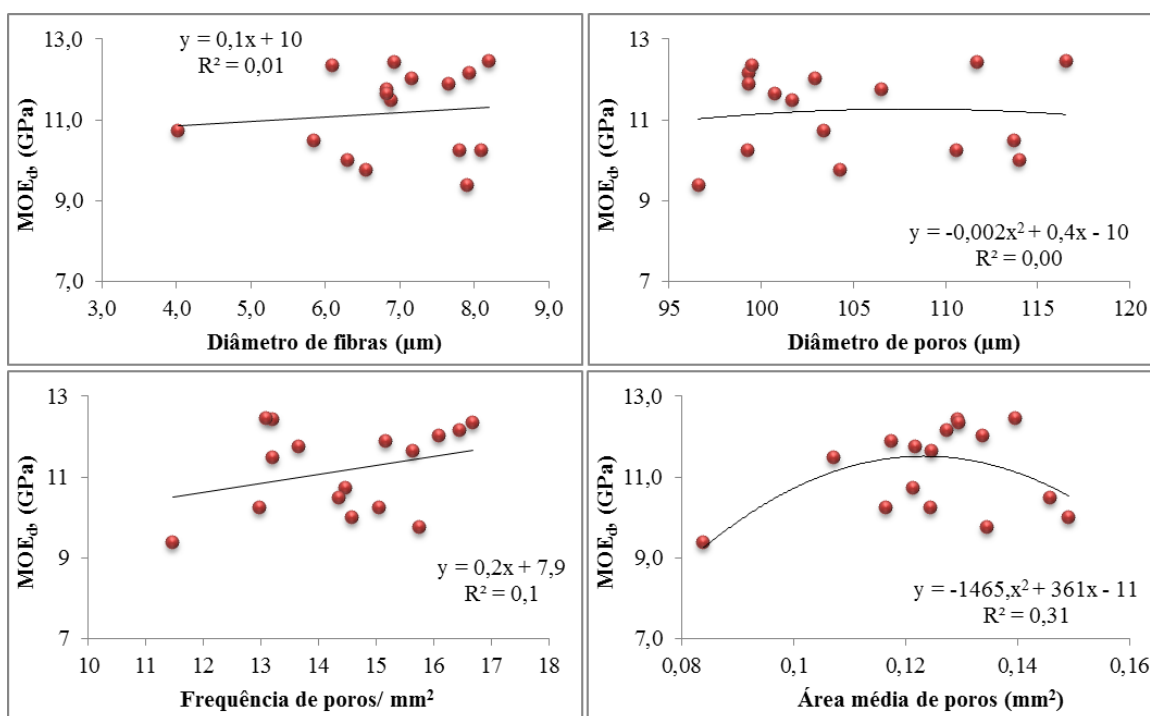
  

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	2,686	0,895	0,778	0,529
Resíduo	12	13,812	1,151		
Total	15	16,498			

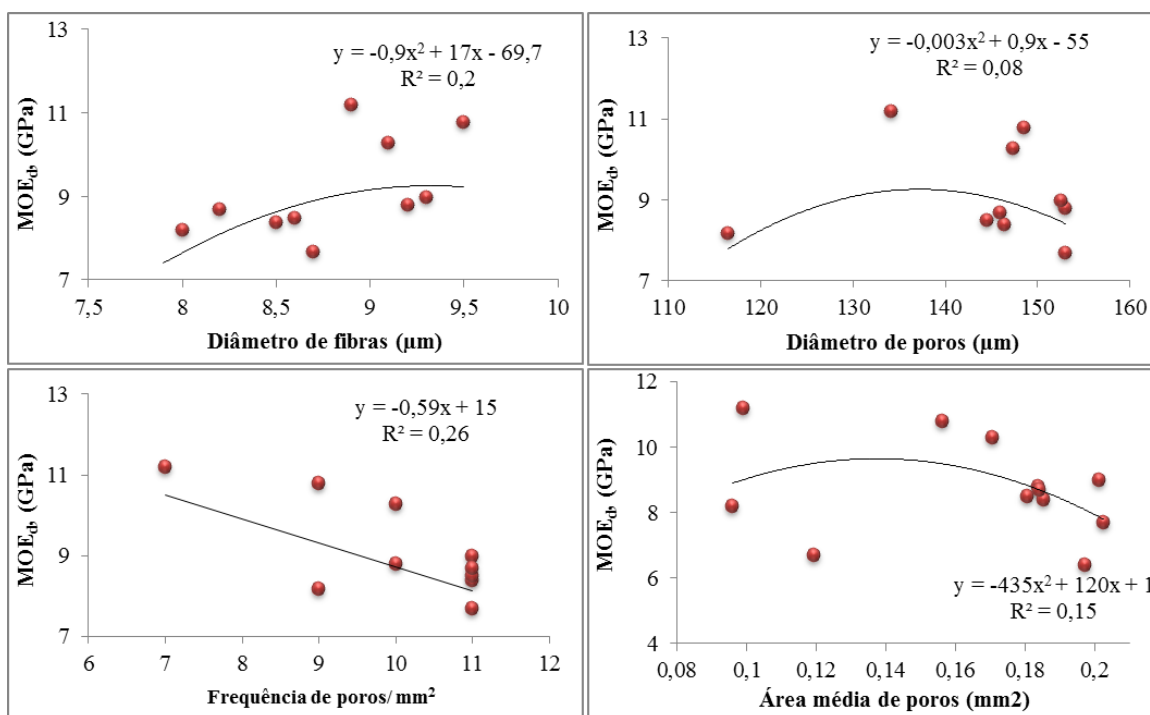
  

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Diâmetro da fibra	0,218	0,270	0,809	0,434
Diâmetro do elemento de vaso	0,030	0,047	0,645	0,531
Elementos de vaso/mm <sup>2</sup>	0,301	0,206	1,458	0,170

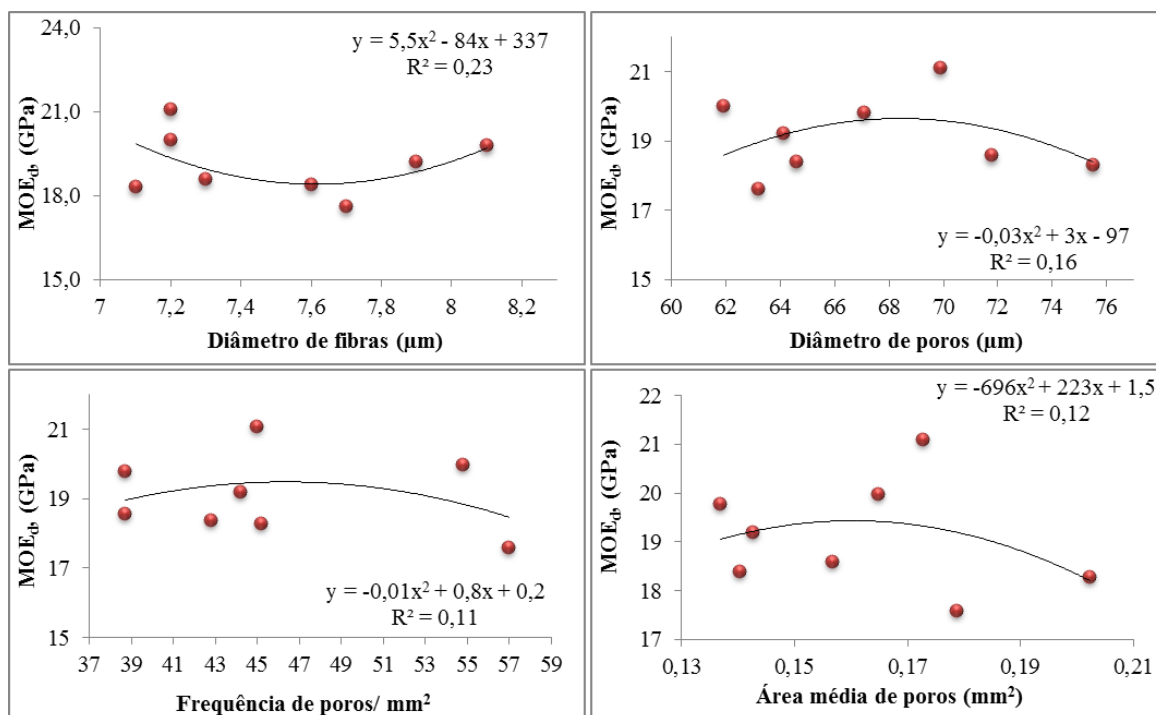
Levando-se em conta que não se obtiveram relações satisfatórias entre os parâmetros anatômicos e o módulo de elasticidade, novas análises foram executadas considerando-se a área ocupada pelos poros como variável independente e, novamente, não se obtiveram níveis razoáveis de correlação. A partir do diâmetro médio dos poros da amostra, uma área média para a seção transversal do poro foi calculada; o produto entre a área média e a frequência média de poros por mm<sup>2</sup> forneceu a área ocupada por este elemento na região observada. As figuras 4.33 a 4.36 foram introduzidas para exibição dos resultados obtidos nas análises de regressão simples com ajustes de curva, demonstrando a fraca correlação observada em todos os casos.



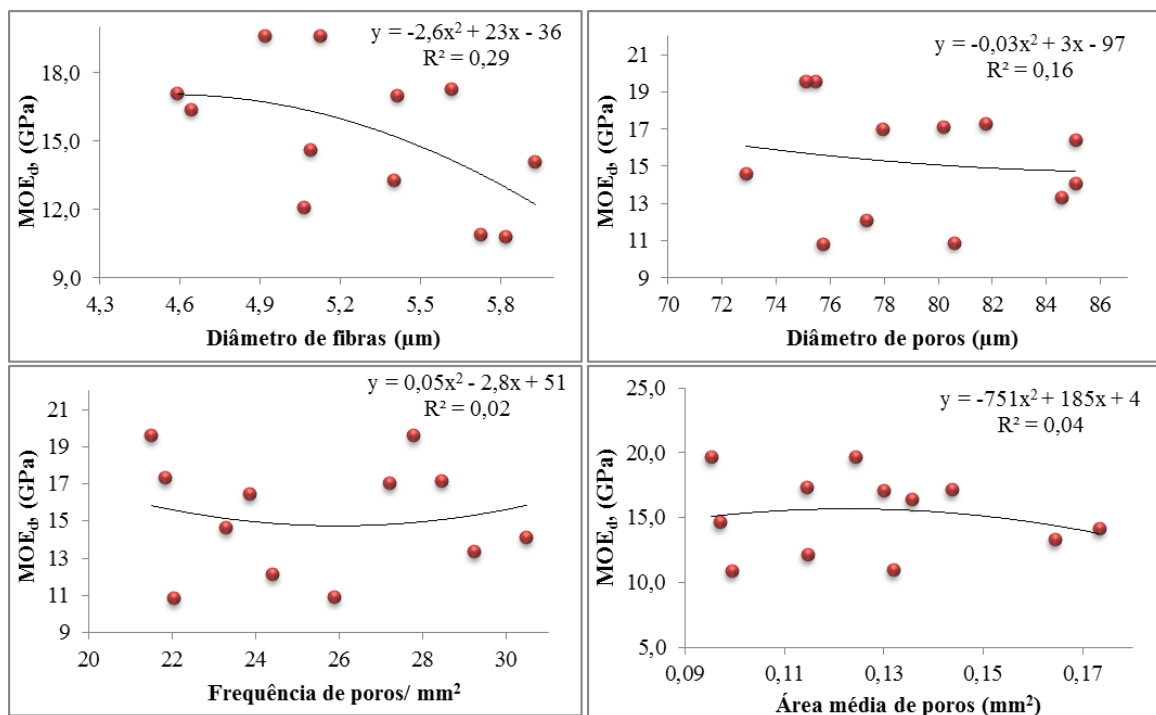
**Figura 4.33:** Análise de dispersão e ajustes de curva entre o MOE<sub>d</sub> e os parâmetros anatômicos examinados para a peça 02 do freijó.



**Figura 4.34:** Análise de dispersão e ajustes de curva entre o MOE<sub>d</sub> e os parâmetros anatômicos examinados para a peça 03 do cedro rosa.



**Figura 4.35:** Análise de dispersão e ajustes de curva entre o MOE<sub>d</sub> e os parâmetros anatômicos examinados para a maçaranduba.



**Figura 4.36:** Análise de dispersão e ajustes de curva entre o MOE<sub>d</sub> e os parâmetros anatômicos examinados para a muiracatiara.

Diante destes resultados, não foi possível o estabelecimento de relações preliminares que possibilitem que, a partir das características anatômicas da face transversal de amostras das espécies de madeira examinadas, o módulo de elasticidade longitudinal seja estimado.

#### 4.6 – Aplicação das propriedades de madeiras amazônicas ao modelo numérico

Finalmente, nesta etapa, as médias obtidas no processo de caracterização de três das madeiras amazônicas examinadas foram aplicadas ao modelo numérico de caixa acústica adotado na pesquisa, e já apresentado anteriormente. Duas hipóteses foram propostas (Fig. 4.37). Na primeira (modelo 1), as propriedades do freijó e do cedro rosa foram aplicadas na placa do tampo harmônico e nos elementos estruturais do modelo (tróculo, culatra, travessas e reforços), respectivamente. Na segunda (modelo 2), em adição, aplicaram-se as propriedades da maçaranduba à placa do fundo. O uso da maçaranduba, neste elemento, não foi indicado por Teles (2005), mas tal hipótese foi levada em conta apenas como teste diante da alta densidade e da menor variabilidade desta espécie, relativamente à muiracatiara. A tabela 4.9 exhibe os conjuntos de frequências naturais do modelo padrão, no qual são aplicadas as propriedades de madeiras tradicionais, e os conjuntos de frequências naturais dos modelos 1 e 2.

- **Padrão** – Abeto, pinho de Riga, Mogno, Jacarandá da Bahia
- **Modelo 1** – Freijó, pinho de Riga, cedro rosa, jacarandá da Bahia
- **Modelo 2** – Freijó, pinho de Riga, cedro rosa, maçaranduba

**Figura 4.37:** Madeiras usadas no modelo numérico para cada hipótese assumida.

Na análise modal numérica, são também apresentados os parâmetros fator de participação (FP), escalar que mensura a interação entre o modo de vibração e uma dada direção de excitação e estima a importância do modo no modelo, e massa efetiva (ME), que estima a quantidade de massa do conjunto envolvida na produção do modo de vibração; o modo que apresenta massa efetiva grande contribui mais significativamente na resposta dinâmica. Esses parâmetros auxiliam a análise dos modos e frequências importantes no modelo e são calculados para cada uma das direções do sistema global de coordenadas. Para a caixa acústica, a direção mais influente na produção sonora é a direção normal ao tampo, sendo, por isso, escolhida para apresentação dos resultados.

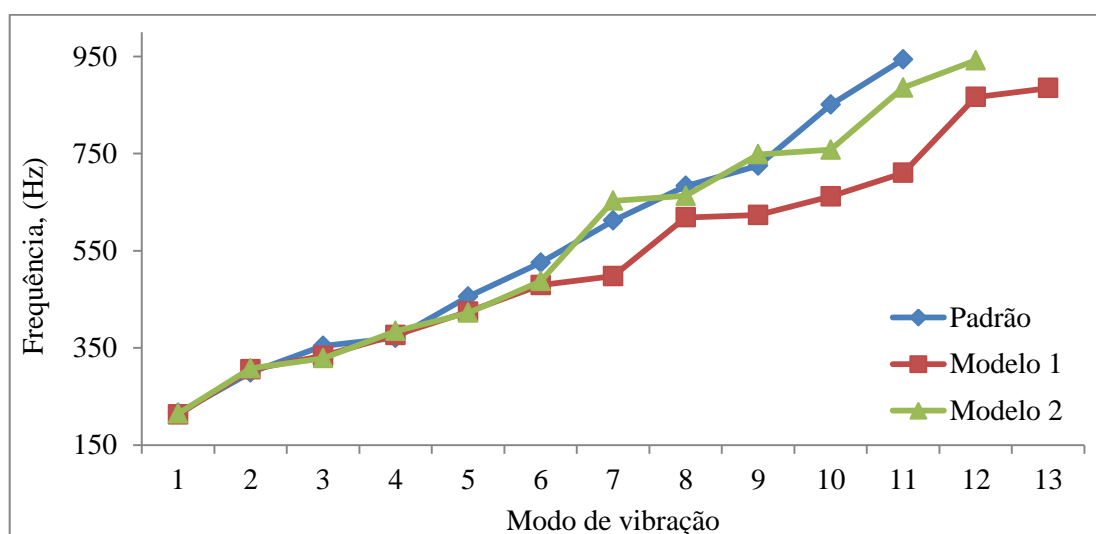
**Tabela 4.9:** Conjuntos de frequências naturais (em Hz) dos modelos analisados (F – frequência, FP – fator de participação normalizado, ME – massa efetiva normalizada)

	Padrão			Modelo 1			Modelo 2		
Massa total do modelo (g)	701			773			820		
	F (Hz)	FP	ME	F (Hz)	FP	ME	F (Hz)	FP	ME
Frequências naturais	216	1,00	1,00	213	1,00	1,00	215	1,00	1,00
	299	0,50	0,25	305	0,50	0,25	308	0,49	0,24
	354	0,13	0,02	334	0,16	0,03	329	0,18	0,03
	371	0,24	0,06	377	0,26	0,07	385	0,28	0,08
	455	0,15	0,02	424	0,14	0,02	422	0,14	0,02
	525	0,16	0,03	479	0,13	0,02	487	0,18	0,03
	612	0,20	0,04	498	0,14	0,02	653	0,20	0,04
	683	0,21	0,04	619	0,13	0,02	663	0,17	0,03
	725	0,09	0,01	624	0,15	0,02	748	0,09	0,01
	851	0,18	0,03	662	0,17	0,03	758	0,17	0,03
	944	0,13	0,02	710	0,17	0,03	886	0,17	0,03
				866	0,15	0,02	942	0,17	0,03
				885	0,18	0,03			

Com a aplicação do freijó e do cedro, a massa do violão aumentou cerca de 10% e, com inserção da maçaranduba, outros 6%, em um total de 119 g (a massa do instrumento é

um fator relevante, normalmente alusivo ao conforto do instrumentista). A aplicação de madeiras amazônicas não gerou alterações significativas nos modos de vibração, relativamente ao modelo padrão.

Apesar de se considerar que os modos superiores a 600 Hz vão se tornando muito complexos e incapazes de envolver quantidade de massa significativa na produção do som, é sabido que o “brilho” atribuído a um instrumento de cordas se deve ao destaque de frequências altas. Com isso, adotou-se um critério para seleção de frequências segundo o qual levaram-se em conta os modos e respectivas frequências cujos fatores de participação normalizados fossem iguais ou superiores a 0,09. A massa cumulativa também foi calculada, sendo esta um somatório das massas efetivas de um determinado modo de vibração e dos modos anteriores a ele. Nos procedimentos práticos de análise de outros sistemas, normalmente se considera que é necessário levar em conta os modos até a formação de 80% da massa cumulativa. Os modos considerados aqui permitiram chegar a um total de 99%. Na figura 4.38, os conjuntos de frequências naturais dos modelos investigados foram plotados para comparação.



**Figura 4.38:** Conjuntos de frequências naturais dos modelos simulados

O primeiro modo de vibração é muito representativo na resposta sonora da caixa acústica por ser um monopolo capaz de envolver grande parte do bojo inferior na vibração e, com isso, transmitir considerável energia ao ar. Este modo apresentou os maiores fatores de participação e as maiores massas efetivas. A análise geral dos valores apresentados para o fator de participação normalizado levou à seleção das frequências apresentadas, porém, a massa efetiva aponta destaque bem mais acentuado para os dois primeiros modos. Para o primeiro modo, são verificadas diferenças entre as frequências do modelo padrão e dos modelos 1 e 2 em 3 Hz e 1 Hz, respectivamente. Para o segundo modo, observam-se diferenças de 6 e 9 Hz. Essas diferenças podem indicar característica tímbrica mais aguda no modelo 2, mas a composição do som formado por todas as frequências naturais obtidas, dentro do intervalo estudado, é necessária para a verificação desta hipótese. Neste contexto, verifica-se que o modelo 1 exibiu as maiores alterações em frequência (para valores superiores a 600 Hz).

Em termos acústicos, a projeção sonora é um dos parâmetros mais observados quando se busca violões de qualidade. Instrumentistas afirmam que as melhores projeções são observadas em instrumentos que levam madeira maciça, tanto no tampo como no fundo e na lateral. Quanto ao timbre, o termo qualidade não se adequa a qualquer situação porque, em grande parte, está relacionado a gostos pessoais subjetivos do instrumentista e a ritmos musicais específicos. Considerando estes fatores, espera-se que os modelos com madeiras amazônicas sugeridos nesta pesquisa apresentem boa projeção sonora, semelhante à observada no violão real, que foi base para o desenvolvimento do modelo numérico e, quanto ao acréscimo no peso do instrumento, um bom número de luthiers concorda que este fator não é preponderante no volume acústico e sim o projeto.

Slouten e Souza (1993) testaram a aplicação de madeiras amazônicas construindo



três protótipos reais que foram analisados por instrumentistas; é possível observar que a qualidade, dentro dos parâmetros considerados pelos autores, se mostrou relacionada ao conjunto das espécies usadas no instrumento e não, necessariamente, a uma única espécie de madeira. Diante disso, é possível que agrupamentos específicos das espécies examinadas, bem como de outras não contempladas neste trabalho, resultem em boas opções de aplicação. Contudo, para que conclusões mais objetivas possam ser apresentadas, quanto aos modelos de caixa acústica com madeiras amazônicas sugeridos aqui, pretende-se dar prosseguimento à pesquisa analisando a resposta numérica forçada do sistema, pela qual novos parâmetros poderão ser explorados. Pretende-se também aprimorar o modelo numérico para que se obtenha um conjunto de frequências mais acurado, o que possibilitará melhor análise das alterações, desta vez, levando-se em conta as frequências das notas musicais (sendo estas as frequências do forçamento aplicado ao se tocar a corda tensionada), o que também abrirá caminho para o estudo de respostas desejadas diante de possíveis alterações nas espessuras das placas do tampo harmônico e fundo, principalmente.

## CONCLUSÕES

Quanto à análise experimental do violão nas fases de construção: caixa/braço e caixa/braço/ponte:

- Foi possível obter o conjunto de frequências naturais através da técnica de excitação por impulso
- A inclusão da ponte no sistema inseriu mudanças mais expressivas inibindo fortemente as frequências acima de 220 Hz.

Quanto ao modelo numérico:

- Mais uma vez se verificou que a hipótese de restrição completa da lateral é válida, mostrando concordância com os resultados experimentais apresentados por Richardson 2010 e Stanciu et al. 2009.
- O conjunto de frequências naturais se mostrou razoavelmente de acordo com a assinatura obtida nos ensaios experimentais, enfatizando a frequência em torno de 220 Hz.

Quanto à sensibilidade do modelo numérico:

- Para variações de até 10% nas madeiras do tampo, não se verificou alterações significativas nas frequências ou nos modos de vibração.
- Variações na madeira que compõe o fundo levaram a mudanças expressivas em boa parte do conjunto de frequências.
- Para variações na massa específica, não se verificaram alterações significativas.

Quanto à caracterização das propriedades mecânicas:

- Os módulos elásticos dinâmicos na direção paralela às fibras foram obtidos via técnica de excitação por impulso para as quatro espécies de madeira estudadas e os resultados

comprovam que os métodos empregados na preparação dos corpos de prova foram adequados.

- Na análise de variabilidade, verificou-se menor variação na massa específica, em comparação com o módulo de elasticidade.
- Diferentes padrões de variabilidade foram observados dentro de peças de uma mesma espécie e entre as espécies.
- A menor variabilidade no módulo de elasticidade e na massa específica foi observada na maçaranduba.
- A maior variabilidade na massa específica foi vista no freijó.
- A maior variabilidade no módulo de elasticidade foi verificada na muiracatiara.
- Em um ponto de vista preliminar, o freijó apresentou certa tendência de minimização da variabilidade do módulo elástico com o tempo, ou seja, peças que exibiram baixa variabilidade na massa específica também a exibiram no módulo. O cedro rosa não apresentou a mesma característica, mostrando variações significativas nos módulos mesmo com a estabilidade da massa específica.

Quanto à análise anatômica:

- Os padrões de direcionamento das fibras parecem acompanhar os resultados obtidos para o módulo: quanto mais direita a grã, menor a variabilidade no módulo de elasticidade.
- Os métodos usados na preparação das amostras para análise microscópica permitiram a observação dos elementos celulares na madeira.
- A observação microscópica com aumentos de 50x, 200x e 500x possibilitou a mensuração do diâmetro dos elementos de vaso e das fibras e a contagem dos poros.

- Todas as madeiras apresentaram variabilidade na estrutura anatômica, relativamente às variáveis mensuradas.

Quanto à relação entre propriedades mecânicas e características anatômicas:

- Não se verificou correlação significativa.

Quanto à aplicação dos valores das madeiras amazônicas ao modelo numérico:

- As diferenças mais notáveis entre os modelos são observadas nas massas totais do sistema e nas frequências naturais correspondentes aos primeiros modos.
- O acréscimo no valor da frequência do segundo modo pode representar característica tímbrica mais aguda das caixas de ressonância confeccionadas com as madeiras amazônicas analisadas.

## **PESQUISAS FUTURAS**

- Geração dos sinais de áudio a partir das frequências apresentadas pelo modelo numérico, buscando-se imitar o som emitido quando um impulso é aplicado à estrutura;
- Aprimoramento do modelo numérico com anexação do braço e da ponte e com a adoção do modelo fluido-estrutura;
- Análise numérica da resposta forçada do modelo;
- Uso da espessura das placas do tampo e do fundo como parâmetros para obtenção de respostas esperadas sob aplicação das madeiras amazônicas;
- Análise de características anatômicas não examinadas neste trabalho visando ainda encontrar possíveis relações entre estas e os parâmetros elásticos da madeira.

## ANEXO A

No Anexo A estão expostos os dados relativos à análise experimental do violão nas fases de construção consideradas na tese.

**Tabela A.1:** Frequências naturais do violão em três etapas de construção. Método: Técnica de excitação por impulso

Ordem do pico no espectro de frequências	Etapas de construção		
	caixa/braço	caixa/braço/ponte	caixa
1	105	105	104
2	144	144	145
3	174	174	168
4	220	202	222
5	237	233	233
6	269	-	287
7	311	308	310
8	342	343	334
9	372	372	369
10	421	413	413
11	473	473	451
12	522	540	530
13	577	593	589
14	618	618	618

## ANEXO B

Neste Anexo, são fornecidas as tabelas referentes à análise de sensibilidade do modelo numérico a acréscimos de até 10% na massa específica e no módulo de elasticidade de cada madeira.

**Tabela B.1:** Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 5% no valor do módulo elástico.

Modo de vibração	Padrão	Abeto	Pinho de Riga	Mogno	Jacarandá	Geral
1	216	217	216	220	233	239
2	299	300	299	308	330	343
3	353	355	354	356	362	367
4	370	371	371	377	405	415
5	418	421	420	423	429	439
6	455	458	456	463	459	470
7	471	472	472	479	516	554
8	501	502	502	515	580	610
9	525	530	527	531	541	528
10	566	566	566	583	657	681
11	601	602	602	622	717	752
12	612	612	612	618	688	696
13	623	623	623	636	745	771

**Tabela B.2:** Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 10% no valor do módulo elástico.

Modo de vibração	Padrão	Abeto	Pinho de Riga	Mogno	Jacarandá	Geral
1	216	217	217	221	234	243
2	299	300	299	310	332	348
3	353	355	355	357	363	370
4	370	371	371	379	409	422
5	418	423	422	424	430	445
6	455	461	456	465	459	476
7	471	472	472	482	518	563
8	501	503	502	518	585	621
9	525	535	527	533	545	537
10	566	566	566	585	665	694
11	601	602	602	626	724	767
12	612	612	612	619	699	709
13	623	623	623	638	753	787

**Tabela B.3:** Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após acréscimo de 5% no valor da massa específica.

Modo de vibração	Padrão	Abeto	Pinho de Riga	Mogno	Jacarandá	Geral
1	216	215	215	215	213	211
2	299	299	299	298	294	292
3	353	351	352	353	351	345
4	370	370	370	368	365	362
5	418	412	416	418	416	408
6	455	449	455	452	454	445
7	471	471	471	469	463	460
8	501	500	501	500	494	490
9	525	518	524	522	525	513
10	566	566	566	566	554	553
11	601	601	601	599	590	587
12	612	612	612	611	599	597
13	623	623	623	622	609	608
14	662	652	659	660	658	646

**Tabela B.4:** Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 10% no valor da massa específica

Modo de vibração	Padrão	Abeto	Pinho de Riga	Mogno	Jacarandá	Geral
1	216	214	215	214	211	206
2	299	298	299	296	289	286
3	353	348	351	352	348	338
4	370	369	370	366	360	353
5	418	406	414	417	414	399
6	455	443	454	449	453	435
7	471	471	471	466	456	450
8	501	498	500	499	487	478
9	525	511	523	519	524	501
10	566	566	566	565	542	540
11	601	600	601	597	579	574
12	612	612	612	609	587	584
13	623	623	623	621	596	595
14	662	643	656	659	650	632

**Tabela B.5:** Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 5% no valor do módulo de elasticidade e da massa específica.

Modo de vibração	Padrão	Abeto	Pinho de Riga	Mogno	Jacarandá	Geral
1	216	216	216	219	230	234
2	299	299	299	306	325	335
3	353	351	353	355	359	358
4	370	370	370	375	398	405
5	418	415	419	423	429	429
6	455	452	455	460	457	459
7	471	472	472	477	516	535
8	501	500	502	513	569	595
9	525	523	526	528	512	541
10	566	566	566	582	642	665
11	601	602	602	620	706	734
12	612	612	612	616	673	680
13	623	623	623	635	730	754

**Tabela B.6:** Conjuntos de frequências (em Hz) do modelo numérico após alteração de 10% no valor da massa específica e do módulo elástico.

Modo de vibração	Padrão	Abeto	Pinho de Riga	Mogno	Jacarandá	Geral
1	216	215	215	220	229	232
2	299	299	299	308	322	333
3	353	349	351	356	357	353
4	370	370	370	375	395	403
5	418	412	418	426	429	424
6	455	448	455	464	456	454
7	471	472	472	477	533	512
8	501	499	501	515	563	593
9	525	520	525	532	510	537
10	566	566	566	584	637	662
11	601	601	602	623	701	732
12	612	612	612	616	670	677
13	623	623	623	637	725	751
14	662	657	663	671	665	662



## ANEXO C

Neste anexo, são apresentados os resultados da caracterização mecânica das peças das quatro espécies madeiras examinadas na tese.

**Tabela C.1:** Massa específica e  $MOE_d$  calculados para corpos de prova de Freijó.

Número do CP	Peça 01		Peça 02		Peça 03	
	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)
1	0,63	13,6	0,52	12,2	0,60	13,9
2	0,62	12,0	0,53	12,4	0,63	13,0
3	0,61	12,4	0,56	12,3	0,61	13,4
4	0,59	11,9	0,47	10,2	0,56	13,1
5	0,63	9,5	0,49	10,7	0,61	12,4
6	0,61	13,6	0,53	12,0	0,59	13,7
7	0,62	9,7	0,47	10,5	0,60	13,2
8	0,62	12,7	0,52	12,4	0,59	13,8
9	0,63	13,1	0,42	9,4	0,62	13,7
10	0,63	12,4	0,42	9,8	0,61	12,9
11	0,62	13,5	0,48	11,8	0,56	13,1
12	0,63	13,2	0,46	11,5	0,61	12,8
13	0,63	12,6	0,43	10,2	0,61	13,2
14	0,64	13,7	0,44	10,0	0,61	12,2
15	0,63	12,4	0,49	11,6	0,60	14,2
16	0,61	12,4	0,50	11,9	0,59	12,8
Média	0,62	12,4	0,48	11,2	0,60	13,2
Desvio padrão	0,01	1,24	0,04	1,05	0,02	0,55
C.V.	2%	10%	8%	9%	3%	4%

**Tabela C.2:** massa específica e  $MOE_d$  calculados para corpos de prova de cedro rosa.

Número do CP	Peça 01		Peça 02		Peça 03	
	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	MOE <sub>d</sub> (GPa)
1	0,40	10,8	0,47	8,3	0,48	8,8
2	0,43	9,6	0,47	8,6	0,47	9,0
3	0,45	11,0	0,46	8,3	0,47	8,4
4	0,46	8,5	0,47	8,6	0,47	7,7
5	0,43	9,3	0,47	8,7	0,47	6,4

6	0,43	9,5	0,47	8,4	0,48	8,5
7	0,43	9,5	0,46	8,4	0,49	10,8
8	0,43	9,4	0,48	9,2	0,51	10,3
9	0,46	10,6	0,48	9,6	0,55	6,7
10	0,43	9,6	0,51	10,2	0,52	8,7
11	0,40	10,5	0,50	9,6	0,53	11,2
12	0,48	10,4	0,51	10,0	0,53	8,2
13	0,46	10,7	0,49	9,2		
14	0,47	9,0	0,52	9,9		
15			0,50	9,9		
16			0,49	9,2		
Média	0,44	9,9	0,48	9,1	0,50	8,7
Desvio padrão	0,02	0,74	0,02	0,66	0,03	1,40
C.V.	5,3%	7,4%	3,9%	7,3%	5,6%	16,0%

**Tabela C.3:** Massa específica e  $MOE_d$  calculados para corpos de prova de maçaranduba e muiracatiara.

Número do CP	maçaranduba		muiracatiara	
	ME (g/cm <sup>3</sup> )	$MOE_d$ (GPa)	ME (g/cm <sup>3</sup> )	$MOE_d$ (GPa)
1	1,10	18,4	0,88	10,8
2	1,11	20,0	0,87	14,1
3	1,09	18,6	0,91	14,6
4	1,09	19,8	0,91	19,6
5	1,08	18,3	0,89	17,3
6	1,10	19,2	0,88	10,9
7	1,07	17,6	0,90	16,4
8	1,09	21,1	0,95	19,6
9			0,87	13,3
10			0,91	12,1
11			0,90	17,0
12			0,89	17,1
Média	1,09	19,1	0,90	15,2
Desvio padrão	0,01	1,06	0,02	2,94
C.V.	1,1%	5,5%	2,4%	19,3%

## ANEXO D

O Anexo D traz os valores obtidos na análise anatômica de amostras de corpos de prova usados na caracterização mecânica. Consideraram-se corpos de prova de uma única peça de cada espécie, de modo que, para o freijó e o cedro rosa, apenas amostras providas das peças 02 e 03, respectivamente, foram analisadas.

**Tabela D.1:** Resultados de mensuração e contagem de elementos celulares do freijó

Amostra	Diâmetro da fibra					Diâmetro do elemento de vaso					Elementos de vaso/mm <sup>2</sup>				
	Média (µm)	Desvio (µm)	c.v. (%)	mínimo (µm)	máximo (µm)	Média (µm)	Desvio (µm)	c.v. (%)	mínimo (µm)	máximo (µm)	Média	Desvio	c.v. (%)	mínimo	máximo
1	7,9	2,5	31,7	4,1	14,0	99,3	24,9	25,1	35,2	165,4	16	3	17,8	12	20
2	6,9	1,9	27,9	3,9	12,0	111,7	27,0	24,2	53,9	180,5	13	1	10,2	11	15
3	6,1	1,8	29,8	4,2	14,0	99,5	23,8	23,9	50,4	175,2	17	3	19,1	12	22
4	8,1	2,2	27,3	3,9	14,1	110,5	22,8	20,6	61,0	154,6	13	4	30,6	6	19
5	4,0	1,2	30,9	2,3	8,4	103,3	31,3	30,3	32,5	196,2	14	4	28,9	10	22
6	7,2	2,1	28,7	3,7	14,2	102,9	25,6	24,9	52,5	167,0	16	3	16,0	11	19
7	5,9	1,3	22,5	4,0	9,3	113,7	23,7	20,8	62,5	177,2	14	4	24,6	8	20
8	8,2	2,0	24,4	4,7	13,9	116,5	19,6	16,8	59,3	158,6	13	3	20,5	10	17
9	7,9	2,6	33,3	3,9	14,5	96,5	26,4	27,3	39,3	144,7	11	2	18,7	8	14
10	6,5	1,7	26,5	3,4	10,1	104,2	24,5	23,5	47,3	166,4	16	5	29,6	11	23
11	6,8	2,1	31,4	3,9	12,3	106,5	20,9	19,7	52,5	159,4	14	3	19,9	10	18
12	6,9	1,5	21,3	4,6	10,4	101,6	27,6	27,2	25,7	182,8	13	3	24,1	7	17
13	7,8	2,0	25,4	4,0	14,9	99,2	27,0	27,2	24,3	145,7	15	5	31,4	8	23
14	6,3	2,4	38,5	2,9	16,0	114,0	27,5	24,1	41,3	165,9	15	5	32,5	9	24
15	6,8	2,3	33,2	4,1	14,0	100,7	23,1	23,0	41,5	148,6	16	5	31,1	9	23
16	7,7	2,0	26,6	4,6	14,4	99,3	28,8	29,0	26,3	168,1	15	4	27,5	9	20
Média geral	6,9	2,0	28,7	2,3	16,0	105,0	25,3	24,2	24,3	196,2	14	3,5	23,9	6	24

**Tabela D.2:** Resultados de mensuração e contagem de elementos celulares do cedro rosa

Amostra	Diâmetro da fibra					Diâmetro do elemento de vaso					Elementos de vaso/mm <sup>2</sup>				
	Média (µm)	Desvio (µm)	c.v. (%)	mínimo (µm)	máximo (µm)	Média (µm)	Desvio (µm)	c.v. (%)	mínimo (µm)	máximo (µm)	Média	Desvio	c.v. (%)	mínimo	máximo
1	9,2	2,2	23,7	4,8	15	153	38,6	25,2	83,4	229,8	10	2	19,6	8	12
2	9,3	1,9	20,5	6,3	14,4	152,6	35	22,9	86,9	226,9	11	2	14,8	9	13
3	8,5	2	23,0	4,6	12,7	146,4	44,1	30,1	57,5	230,2	11	2	15,7	9	13
4	8,7	2	22,8	4,5	13,4	153,1	40,9	26,7	81,6	247,2	11	1	7,5	10	12
5	9,3	1,9	20,2	6	13,7	151,1	36	23,9	81	234,2	11	1	5,9	10	12
6	8,6	2	23,3	5	15,7	144,6	44,3	30,6	43,5	243,3	11	3	25,7	8	15
7	9,5	2,3	24,0	4,7	14,2	148,6	42,9	28,8	74,3	250,5	9	2	25,7	7	13
8	9,1	1,5	16,8	6,4	12,8	147,4	36,6	24,8	54	218,2	10	2	22,7	8	13
9	7,9	1,8	22,9	4,2	12	129,9	40,8	31,5	46,5	217,9	9	2	22,1	6	11
10	8,2	1,8	22,1	4,7	11,3	146	41	28,1	64,8	233,6	11	2	20,8	8	13
11	8,9	1,8	19,7	4,2	11,8	134,1	36	26,9	71,1	227,4	7	1	14,1	6	9
12	8	1,8	22,6	5	11,8	116,4	38,5	33,1	58,1	230,9	9	2	18,8	8	11
Média geral	8,8	1,9	21,8	4,2	15,7	143,6	39,6	27,7	43,5	250,5	10,0	1,8	17,8	6,0	15,0

**Tabela D.3:** Resultados de mensuração e contagem de elementos celulares da maçaranduba

Amostra	Diâmetro da fibra					Diâmetro do elemento de vaso					Elementos de vaso/mm <sup>2</sup>				
	Média (µm)	Desvio (µm)	c.v. (%)	mínimo (µm)	máximo (µm)	Média (µm)	Desvio (µm)	c.v. (%)	mínimo (µm)	máximo (µm)	Média	Desvio	c.v. (%)	mínimo	máximo
1	7,6	1,4	18,1	4,1	9,9	64,6	12,9	19,9	32,2	93,7	42,8	4,1	9,7	36,2	49,6
2	7,2	1,2	16,4	4,8	10,6	61,9	11,4	18,4	33,0	84,0	54,8	4,2	7,6	48,0	59,1
3	7,3	1,0	14,2	4,9	9,9	71,8	10,9	15,2	47,7	97,0	38,7	5,1	13,2	31,5	47,2
4	8,1	1,2	14,9	5,4	10,1	67,1	12,5	18,5	34,8	88,1	38,7	2,0	5,2	35,4	41,7
5	7,1	1,2	17,1	4,5	9,3	75,5	11,8	15,6	44,0	92,5	45,2	3,5	7,8	40,9	49,6
6	7,9	1,2	15,1	5,5	11,2	64,1	12,8	19,9	29,0	86,0	44,2	7,8	17,7	33,9	57,5
7	7,7	0,9	11,1	6,0	10,1	63,2	11,8	18,7	29,1	84,3	57,0	5,3	9,3	50,4	66,1
8	7,2	1,2	17,0	5,1	10,5	69,9	14,4	20,6	25,1	93,8	45,0	4,8	10,6	37,0	49,6
Média geral	7,5	1,2	15,5	4,1	11,2	67,3	12,3	18,4	25,1	97,0	45,8	4,6	10,1	31,5	66,1

**Tabela D.4:** Resultados de mensuração e contagem de elementos celulares da muiracatiara

Amostra	Diâmetro da fibra					Diâmetro do elemento de vaso					Elementos de vaso/mm <sup>2</sup>				
	Média (µm)	Desvio (µm)	c.v. (%)	mínimo (µm)	máximo (µm)	Média (µm)	Desvio (µm)	c.v. (%)	mínimo (µm)	máximo (µm)	Média	Desvio	c.v. (%)	mínimo	máximo
1	5,8	0,9	15,7	4,2	8,3	75,7	17,6	23,2	30,4	113,9	22,0	7,4	33,4	11,8	30,7
2	5,9	1,1	18,0	4,5	9,0	85,1	18,9	22,2	36,5	142,0	30,5	3,8	12,5	25,2	35,4
3	5,1	0,7	14,6	4,0	7,4	72,9	10,0	13,7	39,2	91,9	23,3	3,6	15,6	17,3	27,6
4	5,1	0,9	17,6	3,7	7,2	75,5	13,1	17,4	30,7	110,6	27,8	5,1	18,2	21,3	35,4
5	5,6	0,7	13,3	4,5	7,4	81,7	14,6	17,8	44,5	114,9	21,8	3,1	14,0	17,3	26,0
6	5,7	1,0	17,7	3,4	8,3	80,6	14,9	18,5	43,7	112,7	25,9	6,3	24,3	15,7	37,0
7	4,6	1,1	22,7	2,8	7,1	85,1	11,7	13,7	53,3	112,3	23,8	5,1	21,2	17,3	31,5

8	4,9	0,9	17,6	3,3	6,6	75,1	16,9	22,5	40,9	117,0	21,5	3,0	14,0	15,0	24,4
9	5,4	0,9	17,3	3,8	8,0	84,6	15,5	18,3	40,4	117,9	29,2	3,2	10,8	25,2	36,2
10	5,1	0,8	16,5	3,2	6,8	77,3	19,6	25,4	32,3	122,5	24,4	4,8	19,7	17,3	31,5
11	5,4	0,8	14,8	3,6	7,1	77,9	18,0	23,2	35,0	125,4	27,2	3,2	11,7	22,8	30,7
12	4,6	0,9	19,72	3,0	6,2	80,2	13,0	16,2	45,1	104,5	28,5	1,7	5,99	26,0	30,7
Média geral	5,3	0,9	17,1	2,8	9,0	79,3	15,3	19,3	30,4	142,0	25,5	4,2	16,8	11,8	37,0

## ANEXO E

Este anexo traz as tabelas fornecidas pelo software Excel ao se executar a análise de regressão multivariada. No presente caso, as correlações entre módulo de elasticidade longitudinal e os parâmetros diâmetro de fibra, diâmetro de poro e frequência de poros por  $\text{mm}^2$  foram investigadas.

**Tabela E.1:** Resultados da análise de regressão multivariada determinando  $\text{MOE}_d$  como variável dependente e os parâmetros anatômicos como variáveis independentes (cedro rosa).

<i>Estatística de regressão</i>					
R-Quadrado		49%			
Erro padrão		1,237			
Observações		12			

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	11,745	3,915	2,559	0,128
Resíduo	8	12,237	1,530		
Total	11	23,983			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Diâmetro da fibra	0,644	1,250	0,515	0,621
Diâmetro do elemento de vaso	0,044	0,076	0,585	0,574
Elementos de vaso/ $\text{mm}^2$	-0,844	0,477	-1,771	0,114

**Tabela E.2:** Resultados da análise de regressão multivariada determinando  $\text{MOE}_d$  como variável dependente e os parâmetros anatômicos como variáveis independentes (maçaranduba)

<i>Estatística de regressão</i>					
R-Quadrado		19%			
Erro padrão		1,346			
Observações		8			

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	1,691	0,564	0,311	0,818
Resíduo	4	7,244	1,811		

Total	7	8,935		
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	46,183	29,265	1,578	0,190
Diâmetro da fibra	-1,679	2,017	-0,832	0,452
Diâmetro do elemento de vaso	-0,145	0,180	-0,805	0,466
Elementos de vaso/mm <sup>2</sup>	-0,103	0,114	-0,902	0,418

**Tabela E.3:** Resultados da análise de regressão multivariada determinando MOE<sub>d</sub> como variável dependente e os parâmetros anatômicos como variáveis independentes (muiracatiara)

<i>Estatística de regressão</i>	
R-Quadrado	28%
Erro padrão	3,059
Observações	12

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	3	29,185	9,728	1,040	0,426
Resíduo	8	74,862	9,358		
Total	11	104,047			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	37,810	19,315	1,958	0,086
Diâmetro da fibra	-3,557	2,099	-1,695	0,128
Diâmetro do elemento de vaso	-0,073	0,249	-0,293	0,777
Elementos de vaso/mm <sup>2</sup>	0,078	0,336	0,232	0,822



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Alves, R.C.; Mantilla, J.N.R.; Bremer, C.F.; Carrasco, E.V.M.** 2015. Application of Acoustic Tomography and Ultrasonic Waves to Estimate Stiffness Constants of Muiracatiara Brazilian Wood. *BioResources* 10(1): 1845-1856.

**Amaral, L. S.; Silva, J. R. M. S.; Hein, P. R. G. H.; Trugilho, P. F.** 2014. Influência do diâmetro e umidade no tratamento preservativo de moirões de Eucalyptus. *Revista Árvore*. Vol.38, n.5, pp.919-925. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000500016>.

**Ansys Theory Reference.** 1992. Revision 5.0. KN-R300:50-4.

**Araújo, B.H.P.; Souza, M.A.R.; Nascimento, H.E.M.; Zanuncio, A.J.V.; Rodrigues, D. D. S.; Guedes, M. C.** 2016. Propriedades físicas da madeira de *Calycophyllum spruceanum* Benth. em função do diâmetro e da posição (base e topo) no fuste. *Sci For* 44(111): 759-768.

**ASTM International.** 2015. ASTM E1876: *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. 17 p. West Conshohocken, PA, USA. doi: 10.1520/E1876-15.

**Bader, R.** 2013. *Nonlinearities and Synchronization in Musical Acoustics and Music Psychology*. Springer. Verlag Berlin, Heidelberg.

**Ballarin, A. W.; Nogueira, M.** 2003. Caracterização elástica da madeira de Eucalyptus citriodora. *Cerne*, Lavras, v. 9, n. 1, p. 66-80.

**Ballarin, A. W.; Nogueira, M.** 2005. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.25, n.1, p.19-28.

**Barboni, L.; Gillich, C.P.; Chioncel, C.P.; Hamat, C.O.; Mituletu, I.C.** 2018. A Method to Precisely Determine the Young's Modulus from Dynamic Measurements. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 416. doi:10.1088/1757-899X/416/1/012063.

**Borland, M. J.** 2014. The effect of humidity and moisture content on the tone of musical instruments. *Ph.D. dissertation*. University of Waterloo, Waterloo, Canada.

**Bucur, V.** 2006. *Acoustics of Wood*. Springer Verlag, Berlin, Germany.

- Burger, M. L. & Richter, H. G.** 1991. Anatomia da madeira. São Paulo: Nobel. 154p.
- Carmo, A. G. O.** 2008. Avaliação do potencial preservativo dos extratos do cerne no alburno da madeira de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson. *Monografia*. UFRRJ. Instituto de Florestas.
- Carrasco, E. V. M.; Mantilla, J. N. R.** 2016. Influência da inclinação das fibras da madeira na sua resistência ao cisalhamento. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 26(2): p. 535-543. ISSN 0103-9954 535
- Carrasco, E.V.M.; Souza, M.F.; Pereira, L.R.S.; Vargas, C.B.; Mantilla, J.N.R.** 2017. Determination of modulus of elasticity of wood depending on the inclination of fibers using acoustic tomography. *Revista Matéria*. 22(Suppl 1). Doi:10.1590/s1517-707620170005.0271.
- Carrera, J. C.; Borges, F. I.; Gomes, J. I.; Gomes, D. P. B.** 2015. Anatomia do lenho de duas espécies de muiracatiara (*Astronium lecointei* Ducke e *Astronium graveolens* Jacq.) *19º Seminário de Iniciação Científica e 3º Seminário de Pós-graduação da Embrapa Amazônia Oriental*. pp (106-110).
- Castera, P.; Morlier. P. (1994).** Variability of the mechanical properties of wood randomness and determinism. *Probabilities and Materials: Tests, Models and Applications*. NATO ASI Series. Series E, *Applied Sciences*, 269: 109-118.
- Clement, c. R.; Higuchi, N.** 2006. A floresta amazônica e o futuro do Brasil. *Ciência e Cultura*, v.58, n.3, p.44-49.
- Cochran, W.T.; Cooley, J.W.; Favin, D.L.; Helms, H.D.; Kaenel, R.A.; Lang, W.W.; Maling, G.C.; Nelson, D.E.; Rader, C.M.; Welch, P.D.** 1967. What is the fast Fourier transform? Volume: 55, Issue: 10 , pp. 1664 – 1674, DOI: 10.1109/PROC.1967.5957. IEEE. Oct. 1967.
- Costa, J.A.** 2017. Classificação de madeiras da Amazônia para composição de instrumento musical de corda por meio da técnica de excitação por impulso. *MSc thesis*. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Florestais e Ambientais. Universidade Federal do Amazonas. Manaus , Brazil.

**Cruz, C.R.; Lima, J.T.; Muniz, G.I.B. 2003.** Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas de híbridos de Eucalyptus. *Sci For* 64(1): 33-47.

**Curtu, I.; Stanciu, M. D.; Crețu, N. C.; Roșca, C. I. 2009.** Modal Analysis of Different Types of Classical Guitar Bodies. *Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on acoustics & music: theory & applications*. ISBN: 978-960-474-061-1

**Curtu, I.; Stanciu, M. D.; Itu, C.; Grimberg, R. 2008.** Numerical modelling of the acoustic plates as constituents of stringed instruments. *6th International DAAAM Baltic Conference industrial engineering*. pp. 24-26. Tallinn, Estonia

**Damodaran, A.; Lessard, L.; Babu, A.S. 2015.** An Overview of Fibre-Reinforced Composites for Musical Instrument Soundboards. *Acoustics Australia*. Vol. 43, Issue 1, pp 117–122

**Eames, A. J.; MacDaniels, L. H. 1953.** An introduction to plant anatomy. Second edition. McGraw-Hill publishing company LTD. Bombay – New Delhi. P. 427.

**Elejabarrieta, M. J.; Ezcurra, A.; and Santamaria, C. 2002.** Coupled Modes of the Resonance Box of the Guitar. *Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 111, No. 5, Pt. 1, pp. 2283-2292.

**Eleotério, J.R.; Silva, C.M.K. 2012.** Comparison of dry kiln schedules for cumaru (*Dipteryx odorata*), jatoba (*Hymenaea* spp.) and muiracatiara (*Astronium lecointei*) obtained by different methods. *Sci For* 40(96): 537-545.

**Filho, D. B. F; Júnior, J. A. S. 2009.** Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ ). *Revista Política Hoje*. Vol. 18, n. 1, pp. 158-166.

**Fletcher, N. H.; Rossing, T. D. 2012.** The physics of musical instruments. Springer Science & Business Media. p. 620.

**Fletcher, N.H.; Rossing, T. 2008.** The Physics of Musical Instruments. Springer Science & Business Media. 756 páginas

**Flores, A.L.L. 2015.** *Análise de diferentes madeiras brasileiras em substituição às espécies tradicionais no violão clássico*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Brasil.

- Fraxe, T. de J. P.; Pereira, H. dos S.; Witkoski, A.C.** 2007. Comunidades ribeirinhas amazônicas: modos de vida e uso dos recursos naturais. Manaus: EDUA, 2007.
- French, M.** 2007. Structural modification of stringed instruments. Vol. 21, Issue 1, January 2007, Pages 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2006.01.002>
- French, M.** 2008. Response variation in a group of acoustic guitars. *Sound & Vibration*, vol. 42, pp. 18–22. Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- French, R. M.** 2008. Engineering the Guitar: Theory and Practice. Springer Science & Business Media. p. 266.
- French, M.; Lewis, K.** 1995. Modal Analysis of an Acoustic Guitar. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2460:808. January, 1995.
- Heideman, M.T.; Johnson, D.H.; Burrus, C.S.** 1985. Gauss and the history of the fast Fourier transform. *Archive for History of Exact Sciences* 34(3): 265-277. doi: 10.1007/BF00348431.
- Homma, A. K. O.** 2013. Agricultura na Amazônia: desafios e perspectivas para o futuro. In: *Simpósio Internacional de Agroecologia do Acre*. Cruzeiro do Sul, AC. p. 21-48.
- Kargarzadeh, H.; Ioelovich, M.; Ahmad, I.; Thomas, S. and Dufresne, A.** 2017. Methods for Extraction of Nanocellulose from Various Sources. Handbook of Nanocellulose and Cellulose Nanocomposites. First Edition. Chapter 1. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 49p.
- Klock, U.; Muñis, G. I. B.; Hernandez, J. A.; Sulato, A. A.** 2005. Química da madeira. Apostila (3ª. Edição revisada). UFPR, Departamento de engenharia e tecnologia florestal.
- Kretschmann, D. E.** 2010. Wood Handbook: Mechanical properties of wood. Chapter 5 (1-3). Wood as an Engineering material, General technical report. Forest Products Laboratory. SPL-GTR-190.
- Lee, M.K.; Fouladi, M.H.; Namasivayam, S.N.** 2016. Mathematical Modelling and Acoustical Analysis of Classical Guitars and Their Soundboards. *Advances in Acoustics and Vibration*. Vol. 2016, Article ID 6084230, 10 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6084230>

- Lima, R.B.** 2017. Produção volumétrica bruta, rendimento e modelagem de madeira serrada de espécies comerciais da Amazônia. *Tese*. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife.
- Lobão, M. S.; Lúcia, R. M. D.; Moreira, M. S. S.; Gomes, A.** 2004. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. *Rev. Árvore*. vol.28 no.6. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622004000600014>
- Longui, E.L.; Yojo, T.; Lombardi, D.R.; Alves, E.S.** 2010. The potential of ipê (*Handroanthus* spp.) and maçaranduba (*Manilkara* spp.) woods in the manufacture of bows for string instruments. *IAWA Journal* 31(2): 149-160.
- Lord, J.D.; Morrel, R.** 2006. Measurement Good Practice Guide 98: *Elastic Modulus Measurement*. 92 p. National Physical Laboratory. Middlesex, London, UK. ISSN 1744-3911. Available from [https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg98\\_elastic](https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg98_elastic) (access 08/07/2019)
- Marchiori, J. N.** 1992. Anatomia da madeira e casca do espinilho, *Acacia caven* (Mol.) Mol. C. Ci. For. v.2 (1). p.27-47.
- Mascia, N. T.** 1991. Considerações a respeito da anisotropia na madeira. *Tese de Doutorado*. Departamento de estruturas, Escola de Engenharia de S. Carlos.
- Melo, L.E.L.; Silva, C.J.; Urbinati, C.V.; Santos, I.S.; Soares, W.F.** 2013. Variação Anatômica no Lenho de *Astronium lecointei* Ducke. *Floram* 20(1): 135-142. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.049>
- Monteiro, P. S.; Macedo, W. R.** 2017. Ciência e Tecnologia de Alimentos: sustentabilidade, desafio e inovação. Capítulo: Enzimas e sua importância para a indústria de alimentos, pp.20.
- Nicholas, N. C.; Gruber, C.; Hartman, N.** 2017. Optimization of Acoustic Soundboard through Modal Analysis and Material Selection. Honors Research Projects. 501. The University of Akron College of Engineering Department of Mechanical Engineering. [http://ideaexchange.uakron.edu/honors\\_research\\_projects/501](http://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/501)
- Nigoski, S.** 2016. Anatomia da madeira. Apostila. UFPR.

- Otani, L.B.; Pereira, A.H.A. 2016.** Technical-scientific Informative ITC-07: *Estimation of the static modulus of elasticity of concrete using the Impulse Excitation Technique*. Revision 1.2. ATCP. S Carlos, Brazil. doi:10.13140/RG.2.2.10454.45120
- Pfeil, W.; Pfeil, M. 2003.** Estruturas de madeira. 6ª edição. LTC editora.
- Pickett, G. 1945.** Equations for computing elastic constants from flexural and torsional resonant frequencies of vibration of prisms and cylinders. *ASTM Proceeding* 45: 846-865. West Conshohocken, PA, USA.
- Popp, J. E. 2012.** Four mass coupled oscillator guitar model. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 1, pp. 829–836, 2012.
- Portela, M.S. 2014.** Estudo das propriedades acústicas da madeira amazônica marupá para tampo de violão. *Tese*. Departamento de Engenharia mecânica – Universidade Federal de S. Catarina. Florianópolis, Brasil.
- Prislan, P.; Cufar, K.; Koch, G.; Schmitt, U.; Gricar, J. 2013.** Institute of Wood Research, Leuschnerstraße 91, D-21031 Hamburg, Germany.
- Ribeiro, R. F. S. 2014.** Análise experimental e simulação numérica da caixa acústica de um violão clássico e seus componentes com o método de elementos finitos. *Dissertação de mestrado*. Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda. Volta Redonda. p.109.
- Ribeiro, R.F.S.; Silva, A.J.; Feiteira, J.F.S.; Medeiros, N. 2013.** Numerical analysis of acoustic guitars soundboards with different fan bracings. *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Congress of Mechanical Engineering*. pp.2506–2512, Ribeirão Preto, Brazil, November 2013.
- Richardson, B. 2010.** Mode studies of plucked stringed instruments: application of holographic interferometry. *Proceedings of the Second Vienna Talk*. Sept. 19–21, p.129-132. University of Music and Performing Arts Vienna, Austria.
- Richardson, B. E.; Johnson, H. R.; Joslin, A. D.; Perry, I. A. 2012.** The three-mass model for the classical guitar revisited. *Proceedings of the Acoustics 2012*, Nantes Conference, pp. 2777–2782, April 2012.

**Roest, M.G.** (2016). Design of a composite guitar. Master Thesis Report. TU Delft, Technische Universiteit Delft.

**Rosa, R. A.; França, L. C. A.; Segundinho, P. G. A.; Lube, V. M.; Paes, J. B.** 2014. Caracterização da madeira de maçaranduba (*Manilkara* sp.) por métodos destrutivos e não destrutivos. *Braz J Wood Sci* 05(01): 68-78. doi: 10.12953/2177-6830

**Rossing, T. D.** 2010. The science of string instruments. Springer Science & Business Media. p. 470.

**Saccaggi, G.; Capozella, J.; Kuebler, D.; Turo, D.; Vignola, J.F.** 2017. An acoustical study focused on the effects of guitar soundboard material on sound propagation The *Journal of the Acoustical Society of America*. 142, 2605. <https://doi.org/10.1121/1.5014536>

**Santos, D.Y.A.C; Ho, F.F.C.** 2014. Gimnospermas: Caracterização, diversidade e distribuição geográfica. *Rev. Árvore* vol.38(5). ISSN 0100-6762. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000500016>

**Shmulsky, R.; Jones, P. D.** 2019. Forest Products and wood Science: An Introduction. 7<sup>th</sup> edition. Wiley blackwell.

**Slooten, H. Van Der; Souza, M. R.** 1993. Evaluaton ol selected Amazonian wood Species for musical instrument manufacture. INPA. Manaus. 123p.

**Soares, M. A.** 2014. Produção de um violão clássico em madeira de teca (*Tectona grandis*). TCC. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Brazil.

**Spinner, S. and Tefft, W. E.** 1961. A Method for Determining Mechanical Resonance Frequencies and for Calculating Elastic Moduli from These Frequencies. *ASTM Proceeding* 61: 1221-1238.

**Spinner, S.; Reichard, T. W. and Tefft, W. E.** 1960. A Comparison of Experimental and Theoretical Relations Between Young's Modulus and the Flexural and Longitudinal Resonance Frequencies of Uniform Bars. *J. Res. Nat. Bur. Stand. - A. Physics and Chemistry* 64A(2): 147-155. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.064A.014>

**Sproßmann, R.; Zauer, M.; Wagenführ, A.** 2017. Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars. *Results in Physics*. Vol.7, pp. 1737-1742. [https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.05.006\\_](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.05.006_)

**Stanciu, M. D.; Curtu, I.; Itu, C.; Grimberg, R.** 2008. Dynamical analysis with finite element method of the acoustic plates as constituents of the guitar. *ProLigno*, vol. 4, no. 1, pp. 41–52, 2008.

**Stanciu, M. D.; Curtu, I.; Lica, D.; Rosca, I. C. R.; Grimberg, R.** 2009. Aspects Regarding the Resonance Frequencies of Guitar Bodies with Different Strutting Systems. *5th International Vilnius Conference EURO Mini Conference*. p.415-420. Vilnius, Lithuania.

**Susin, F.** 2018. *Caracterização e secagem da madeira de 12 espécies amazônicas*. PhD thesis. Universidade Federal de S. Maria, S. Maria, Brazil.

**Szücs, C. A.; Terezo, R. F.; Valle, A.; Moraes, P. D.** 2015. Estruturas de madeira. Apostila. Versão 3. UFSC. Brasil.

**Targa, L.A.; Ballarin, A.W.; Biaggioni, M.A.M.** 2005. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. *Eng. Agríc.* 25(2): 291-299.

**Teles, R.F.** 2005. Avaliação acústica das novas espécies para utilização em instrumentos musicais: Avaliação de madeiras amazônicas para utilização em instrumentos musicais. Report CNPq/IBAMA (unpublished). 33p. Brasil.

**Torres, J. A.; Boullosa, R. R.** 2009. Influence of the bridge on the vibrations of the top plate of a classical guitar. *Applied Acoustics*. vol. 70, no. 11-12, pp. 1371–1377, 2009.

**Vale, A. C.** 1996. Comparação entre modelos numéricos e experimentais em análise dinâmica de placas. Dissertação. Faculdade de engenharia da universidade do Porto. Departamento de engenharia mecânica e gestão industrial. Porto, Portugal.

**Valente, B.M.D.R.T.; Evangelista, W.V.; Silva, J.D.C.; Lucia, R.M.D.** 2013. Variabilidade radial e longitudinal das propriedades físicas e anatômicas da madeira de angico-vermelho. *Sci For* 41(100): 485-496.



**Vergani, C.; Giadrossich, F.; Buckley, P.; Condera, M.; Pividori, M.; Salbitano, F.; Rauch, H.S.; Lovreglio, R.; Schwarz, M.** 2017. Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review. *Earth-Science Reviews*. Vol. 167, pp. 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.02.002>

**Zaczèski, M. E.; Beckert, C. H.; Barros, T. G.; Ferreira, A. L.; Freitas, T. C.** 2018. Violão: aspectos acústicos, estruturais e históricos. *Rev. Bras. Ensino Fís.* vol.40(1). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0192>.