



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

LOHANA ARAUJO HADDAD

**PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA DE *Pinus caribaea* APÓS A
INSERÇÃO DE EXTRATIVOS**

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JANEIRO – 2023



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

LOHANA ARAUJO HADDAD

**PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA DE *Pinus caribaea* APÓS A
INSERÇÃO DE EXTRATIVOS**

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

Prof. Dr. Alexandre Miguel do Nascimento
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JANEIRO – 2023

**PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA DE *Pinus caribaea* APÓS A
INSERÇÃO DE EXTRATIVOS**

LOHANA ARAUJO HADDAD

APROVADA EM: 28/02/2023

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre Miguel do Nascimento – UFRRJ
Orientador

Francisco Antonio Lopes Laudaes – UFRRJ
Membro

Natália Dias de Souza – UFRRJ
Membro

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”. Dedico este trabalho a Deus, pois sem Ele não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, e por ter guiado e me encorajado a chegar até aqui. A Ele toda honra e glória por mais essa etapa.

Ao Marco Lorena, meu padrasto, e Amanda Lorena, minha mãe, que sempre foram meu alicerce, que apoiaram e permitiram que eu fosse para tão longe em busca dos meus sonhos, que sempre lançaram palavras de carinho e de força para que eu pudesse continuar. A minha mãe, mais especificamente, que durante toda a minha vida sempre acreditou em mim, e nunca deixou que nada me faltasse, e que mesmo sendo uma mãe tão jovem me ensinou a ter força e determinação para correr atrás dos meus objetivos.

A minha irmãzinha, Ayla Lorena, que nasceu durante a pandemia da COVID-19, e mesmo em um momento tão delicado trouxe tanto amor e felicidade para nossas vidas.

Ao meu pai, Deivis Haddad, pelo incentivo e compreensão por tantas vezes em que estive ausente para viver o sonho e o propósito de estar em uma universidade federal, algo de tanto significado para nós.

Ao meu companheiro, Cleber Mendes, pelo amor, cumplicidade, apoio, paciência e, também, pelas dicas, conselhos que me ajudaram a trilhar essa fase final. Suas palavras de apoio e carinho diariamente foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

As minhas amigas, Ana Luiza Alves e Caroline Almeida, às quais foram minhas companheiras de república e fizeram meus dias em Seropédica serem mais leves. Nunca me esquecerei das frequentes idas a sorveteria devido ao calor escaldante de Seropédica, da vida fitness que tentamos ter, dos brigadeiros, risadas e momentos únicos que compartilhamos.

Aos meus colegas de graduação, mais especificamente, Larissa, Marcelle, Esther, Victoria, Rodrigo, Dani, Arthur, por estarem presente durante todo o caminho até aqui, e que me ajudaram de alguma forma, seja no compartilhamento de material de estudos, na formação de grupos de seminários, na troca de informações acerca das matérias, mas, principalmente, pela amizade criada e que levarei para vida.

A todos os meus amigos que me ajudaram com palavras de incentivo e de apoio mesmo estando distante.

Ao professor, orientador, Alexandre Miguel, que além de tantos ensinamentos passados, foi dono de um zelo, e uma empatia sem igual durante um período tão difícil como o da COVID-19.

Aos meus colegas de laboratório Daiana Souza, Carol Santos, Francisco Laudares, pela disponibilidade em ajudar, e por compartilharem seus conhecimentos, tornando possível a construção desse trabalho.

Aos professores Renata Oliveira e Douglas Chaves por terem ajudado nas análises químicas FTIR e no processo de liofilização, respectivamente.

A professora Natalia Dias e o Francisco Laudares por terem aceitado compor a minha banca, e terem contribuído para a conclusão de mais essa etapa na minha vida.

A toda equipe GELAF - INEA por terem me recebido no estágio de braços abertos, e terem compartilhado tantos ensinamentos comigo. Além de vocês serem uma referência profissional para mim, tenho certeza que construí laços para além da vida profissional.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pelo ensino gratuito, público e de qualidade.

Aos professores do Instituto de Florestas (IF - UFRRJ) por todo conhecimento profissional, e de vida transmitido durante a graduação.

A PIBIC-CNPQ pelo apoio financeiro.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A madeira por ser um material universal, renovável e econômico, sempre esteve relacionada direta ou indiretamente com a evolução acústica da sociedade. Entretanto, a alta variabilidade associada a esse material traz algumas desvantagens. Assim, o presente estudo analisou os efeitos no tratamento físico-químico frente a influência da lixiviação e impregnação de extrativos em amostras de alburno na madeira de *Pinus caribaea var. caribaea* sob diferentes níveis de impregnação, com o intuito de avaliar seu desempenho acústico. Pré-teste de absorção de água foi executado, para compreender o tempo necessário para a absorção de água/extrativos em função do tempo. Na sequência, as amostras foram tratadas por simples lixiviação em água, impregnadas ou não com extrativos de pau-brasil, e submetidas ao método de vibração transversal, por um dispositivo eletromecânico desenvolvido no Laboratório de Modificação Físico-Química da UFRRJ, cuja vibração resultante é capturada por um microfone comum conectado a um computador com placa de som, e este sinal analisado por um programa com a transformada de Fourier. As variáveis dependentes obtidas foram: a frequência natural de ressonância, a atenuação acústica (decaimento logarítmico), o módulo de elasticidade dinâmico e a eficiência de conversão acústica, em que as comparações entre as médias dos tratamentos foram feitas pelo teste t, ao nível de 5% de significância. Não foram observadas diferenças entre os valores dos módulos de elasticidade dinâmico, assim como na frequência natural de ressonância dos diferentes tratamentos, com valores médios de 14,4 GPa e 629 Hz, respectivamente. A atenuação acústica (decaimento logarítmico) foi afetada pela lixiviação e pela inserção de extrativos na madeira, reduzindo em 9% e 34%, respectivamente, quando considerado o controle como referência. A lixiviação reduziu a densidade aparente da madeira enquanto a inserção de extrativos trouxe aumento não significativo. A eficiência de conversão acústica aumentou nas madeiras lixiviadas e com inserção de extrativos em 11,7% e 48,3%, respectivamente. Como conclusão, afirma-se que a inserção de extrativos, assim como a simples lixiviação, melhora algumas das propriedades acústicas da madeira.

Palavras-chave: Modificação por impregnação. Atenuação acústica. Lixiviação

ABSTRACT

Wood, as a universal, renewable and economical material, has always been directly or indirectly related to the acoustic evolution of society. However, the high variability associated with this material brings some disadvantages. This way, the present study analyzed the effects on the physical-chemical treatment against the influence of leaching and impregnation of extractives in sapwood samples of *Pinus caribaea* var. *caribaea* wood under different levels of impregnation, in order to evaluate its acoustic performance. Water absorption pre-testing was performed, to understand the time required for water/extractives absorption as a function of time. Then, the samples were treated by simple water leaching, impregnated or not with Brazil wood extractives, and submitted to the transversal vibration method, caused by an electromechanical device developed in the Physical-Chemical Modification Laboratory of UFRRJ, whose resulting vibration is captured by a common microphone connected to a computer with a sound card, and this signal is analyzed by a program with the Fourier transform. The dependent variables obtained were: the natural frequency of resonance, the acoustic attenuation (logarithmic decrement), the dynamic modulus of elasticity and the acoustic conversion efficiency, being the comparisons between the means of the treatments made by the t-test, at the 5% significance level. No differences were observed between the dynamic modulus of elasticity values as well as in the natural resonance frequency of the different treatments, with average values of 14.4 GPa and 629 Hz, respectively. Acoustic attenuation (logarithmic decrement) was affected by leaching and the insertion of extractives into the wood, reducing by 9% and 34%, respectively, when considering the control as a reference. Leaching reduced the bulk density of the wood while the insertion of extractives brought about a non-significant increase. Acoustic conversion efficiency increased in the leached and with insertion of extractives woods by 11.7% and 48.3%, respectively. In conclusion, it is stated that the insertion of extractives, as well as simple leaching, improves some of the acoustic properties of wood.

Keywords: Modification by impregnation. Acoustic attenuation. Leaching

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 A MADEIRA E SUA CARACTERIZAÇÃO E UTILIZAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE INSTRUMENTOS MUSICAIS	2
2.2 ASPECTOS GERAIS DA MADEIRA QUE AFETAM SEU USO.....	3
2.2.1 Teor de umidade	3
2.2.2 Densidade	5
2.2.3 Retratabilidade	5
2.3 COMPONENTES ESTRUTURAIS E NÃO ESTRUTURAIS DA MADEIRA.....	6
2.3.1 Celulose	7
2.3.2 Hemiceluloses.....	7
2.3.3 Lignina.....	8
2.3.4 Extrativo	8
2.4 CERNE E ALBURNO	8
2.5 PROCESSOS DE MODIFICAÇÕES DA MADEIRA.....	9
2.6 ACÚSTICA	10
2.6.1 Som.....	10
2.6.2 Frequência natural de ressonância, atenuação acústica e decaimento logarítmico (DI)..	10
2.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS	11
2.7.1 Módulo de elasticidade dinâmico (E_{din})	11
3 MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1 PRODUÇÃO E MENSURAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	12
3.2 PRÉ-TESTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	13
3.3 PRODUÇÃO DE EXTRATIVOS	13
3.4 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO ACÚSTICA	16
3.5 LIXIVIAÇÃO NAS AMOSTRAS DE ALBURNO E INSERÇÃO DE EXTRATIVOS	17
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5 CONCLUSÃO.....	23
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da análise física, e dos testes acústicos da madeira sem tratamento: lenhos de cerne e alburno.....	21
Tabela 2 - Resultados das propriedades acústicas das madeiras de alburno tratadas por lixiviação e inserção de extrativos, e as amostras de controle.....	21
Tabela 3 - Propriedades mecânicas e físicas da madeira de alburno, natural e tratadas.....	22
Tabela 4 - Concentração cumulativo de extrativos após cada ciclo de impregnação.....	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema geral dos componentes químicos na madeira.....	7
Figura 2 - Seção transversal do tronco	9
Figura 3 - Amostras selecionadas e marcadas após mensuração	12
Figura 4 - Queda da árvore de Pau-brasil (<i>Caesalpinia echinata</i>) em frente ao Pavilhão principal (P1) da UFRRJ	13
Figura 5 - Extrator Soxhlet e cartucho com pó de Pau-brasil (<i>Caesalpinia echinata</i>).....	14
Figura 6 - Rotavapor com a solução de extrativo de Pau-brasil (<i>Caesalpinia echinata</i>)	14
Figura 7 - Extrativos em tubos Falcon para o processo de Liofilização	15
Figura 8 - Pó de extrativos de Pau-brasil (<i>Caesalpinia echinata</i>) liofilizados.....	15
Figura 9 - Cotas retiradas das soluções, antes e após o ciclo de inserção	16
Figura 10 - Simulação do equipamento utilizado para os ensaios de vibração transversal....	17
Figura 11 - Amostras inseridas na proveta para receber vácuo com 700 mm de Hg, por um período de 40 minutos	18
Figura 12 - Amostras após a inserção dos quatro ciclos de extrativos.....	19
Figura 13 - Incremento da absorção de água da madeira de cerne e alburno, em função do tempo acumulado de vácuo.	20

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a partir do mapa atual de cobertura vegetal dos biomas brasileiros, publicado em 2019, o IBGE (2019) indica que há seis biomas distintos no Brasil: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal, e a floresta Amazônica é o de maior extensão com cerca de 49,5% do território nacional, seguido pelo bioma do Cerrado, 23,3%. No bioma Amazônico crescem aproximadamente 2500 espécies de árvores, e isso corresponde a um terço de toda a madeira tropical e, devido a essa característica, acontece nessa região um dos principais impactos nocivos à floresta: o desmatamento. Em que, as principais causas desse desmatamento são: a pecuária extensiva, a agricultura, a construção de estradas e hidrelétricas, e atividade madeireira, que muitas das vezes é ilegal (MOREIRA, 2009).

Essa extração ilegal pode ser explicada em parte pelo esgotamento das madeiras de alto valor agregado da região Sul do País, com isso, a grande quantidade de espécies de madeiras da Amazônia ficaram ameaçadas, pois além de abundantes, possuíam elevado valor comercial (HUMMEL et al., 2010). Essa prática devastadora tornou algumas espécies ameaçadas de extinção e, como consequência, levou o Governo Federal a lançar normas regulamentadoras para a extração de espécies nessa condição (PORTARIA N° 148, 2022). A partir dessa restrição, as principais madeiras alvo da construção de instrumentos musicais tornaram-se escassas e de alta demanda elevando, assim, o custo de produção desses instrumentos. Portanto, percebe-se que o uso e manejo sustentável das florestas, bem como de estudos que priorizem a melhoria da qualidade de outras madeiras, diferente das que já são preferíveis pelo mercado, tornam-se essenciais para a diminuição dos impactos negativos gerado pela exploração de espécies vulneráveis ou ameaçadas de extinção, e na melhor viabilidade para o setor acústico.

A evolução da acústica na sociedade sempre esteve diretamente relacionada ao uso de madeira. Seja na confecção de instrumentos musicais, seja na construção de barreiras para isolamento acústico, o uso desse material é extremamente aceito devido a sua alta adaptabilidade. Entretanto, a alta variabilidade associada a esse material também é responsável por suas desvantagens. Hill (2006) atribui o fato de o uso de madeira ainda não ser mais difundido mundialmente a fatores como: instabilidade dimensional associada a mudanças atmosféricas, susceptibilidade a ataques biológicos e algumas restrições de uso devido à umidade.

Dentre as desvantagens expostas, a madeira enquadra-se como um material heterogêneo, ou seja, com grande variação do seu conteúdo interno. Sua composição se dá, principalmente, por celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos, e a variação na quantidade desses componentes para diferentes espécies exemplifica a variabilidade desse material (CARVALHO et al., 2009). Dessa forma, esses constituintes, embora não expliquem inteiramente o comportamento acústico, são fatores que exercem grande influência nas propriedades vibracionais das madeiras (LONGUI et al., 2012).

Além da sua composição química, o potencial acústico de madeiras varia em função de diversos fatores, como por exemplo: o teor de umidade, as características anatômicas e as propriedades físicas e mecânicas do material (DER SLOOTEN & SOUZA, 1993; RUJINIRUN et al., 2005; NETO et al., 2008; SEGUNDINHO et al., 2017). Esses parâmetros têm relação tanto com o uso de madeiras na propagação do som (instrumentos musicais, por exemplo), quanto na sua absorção (por exemplo, barreiras de isolamento acústico).

Esses diversos fatores podem agir diretamente sobre as propriedades vibracionais ou afetá-las indiretamente, agindo sobre outros fatores devido à alta correlação entre alguns deles. Wegst (2006), por exemplo, demonstrou que a alta correlação entre o módulo de elasticidade e a densidade da madeira, poderia definir os diferentes usos das espécies no cenário musical. O módulo de elasticidade se apresenta como um importante fator para definir a qualidade musical

de madeiras, e seu comportamento se relaciona de maneira inversa ao atrito interno ou amortecimento acústico (RUJINIRUN et al., 2005; BRÉMAUD et al., 2011; SPROßMANN et al., 2017).

Então, devido ao caráter de origem natural da madeira há limitações impostas para que esta seja usada livremente. A necessidade em torno de modificações que busquem otimizar as propriedades da madeira é uma realidade existente, principalmente, a fim de sanar algumas problemáticas relacionadas à sua sensibilidade à umidade (higroscopicidade), baixa estabilidade dimensional, dureza e resistência ao desgaste, baixa resistência à biodeterioração contra fungos, cupins, brocas marinhas. De acordo com Sandberg et al. (2017) há três grupos de processos de modificação da madeira que foram recentemente introduzidos no mercado: processamento químico, processamento termo-hídrico (tratamento termal); e processamento termo-hidro-mecânico. Além disso, Sandberg et al. (2017) também expressa que há outro tipo de modificação da madeira, sendo esta última uma modificação por impregnação.

O presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento acústico da madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea* após modificação por lixiviação em água, e impregnação com extrativo de Pau-Brasil, a partir do método vibracional transversal. Os objetivos específicos são: comparar o lenho de cerne e de alburno quanto a densidade aparente, a frequência natural de ressonância, o módulo de elasticidade dinâmico e o decaimento logarítmico; verificar o efeito da lixiviação e da inserção de extrativos na madeira de alburno quanto a sua: rigidez, densidade, frequência de ressonância ou frequência natural, decaimento logarítmico e eficiência da conversão acústica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A madeira e sua caracterização e utilização para produção de instrumentos musicais

A madeira é classificada como um material higroscópico devido a sua capacidade de absorver ou perder água para o meio em que está inserida. Esta particularidade está relacionada com a sua constituição química, em que varia desde substâncias de baixo peso molecular até os polímeros de celulose, hemiceluloses e lignina. Esta característica peculiar da madeira e de alguns outros materiais afeta sensivelmente suas propriedades físicas e mecânicas. Para se entender as mudanças mecânicas, físicas e químicas ocorridas na madeira sob a influência do calor e umidade, é importante conhecer as características básicas dos principais constituintes da madeira. (HILL, 2006, WASTOWSKI, 2018).

Por ser um material de origem biológica, a madeira tem grande variabilidade em sua estrutura e propriedades específicas que refletem sua complexidade (MELO, 2013). Existem vários estudos para identificação dos fatores que podem afetar as propriedades físico-mecânicas da madeira, e os que podem ser inerentes a ela própria, como também a influência do ambiente onde a árvore se desenvolve (LOBÃO et al., 2004).

As propriedades mecânicas da madeira dependem de vários fatores como: densidade básica, porcentagem de madeira juvenil, largura dos anéis, ângulo das microfibrilas, inclinação, grã, quantidade de extrativos, teor de umidade, intensidade ao ataque de insetos, tipo e da localização e quantidade de nós, dentre outros fatores (EVANS et al., 2000). O ambiente, bem como sua manipulação, também pode afetar as características e a qualidade da madeira. Podem ser significativamente diferentes as propriedades físico-mecânicas da madeira de árvores plantadas em um ambiente exótico, daquelas cultivadas em um ambiente nativo (SHIMOYAMA, 1990).

A madeira de *Pinus* sp. é designada na literatura internacional como “softwood”, ou seja, madeira macia ou de baixa densidade. Segundo Ballarin e Palma (2003), foram encontradas densidades de 0,36 g/cm³ para o lenho juvenil de *Pinus caribaea* e 0,68 g/cm³ para

o lenho adulto dessa mesma espécie. A durabilidade natural da madeira das espécies de *Pinus sp.* é estimada por vários autores como inferior a dois anos, se estiver em contato direto com o solo, segundo Barillari et al. (2002). Algumas espécies de *Pinus sp.* apresentam uma proporção de água, em relação ao seu peso seco, superior a 100% (COSTA et al., 2001). Segundo Moura e Brito (2001), o lenho de compressão é característico das coníferas, sendo caracterizado pelo maior teor de lignina e menor teor de celulose, o que pode influir na higroscopicidade da madeira. Apesar disso, dentre as propriedades físicas e mecânicas da madeira destacam-se sua baixa densidade específica e seu alto módulo de elasticidade e de ruptura, as quais permitem confeccionar um instrumento musical resistente, porém de fácil manuseio pelo músico (WEGST, 2006).

Desse modo, madeiras que tenham maior quantidade de lenho juvenil tendem a apresentar maior variação dimensional, influenciando na qualidade final do produto obtido a partir dessa matéria-prima. Atualmente, com o decréscimo do suprimento de árvores adultas com grandes diâmetros, provenientes de florestas naturais, tornou-se comum a produção de madeira em ciclos curtos, através da adoção de espécies de rápido crescimento (BALLARIN & PALMA, 2003).

A madeira de ressonância pode ser definida, de forma geral, como um material que apresenta características e comportamentos desejáveis para fins acústicos. Apesar de existirem diversas madeiras difundidas no mundo há seletividade para aquelas que são de fato utilizadas para fins acústicos (SOUZA, 1983). Por ser um material orgânico, a madeira apresenta uma variedade expressiva de combinações de propriedades acusticamente relevantes entre as espécies, entre diferentes indivíduos e até mesmo em uma única árvore, o que torna cada peça única. Para alguns casos, certas espécies madeireiras são consideradas insubstituíveis, pois apresentam uma combinação de propriedades físicas, mecânicas e acústicas singular, distinta de todos os materiais naturais e sintéticos disponíveis, como os arcos de violino confeccionados em Pau-Brasil (*Paubrasilia echinata*) (FLETCHER, 1999; BRÉMAUD, et al., 2008).

Ainda nos dias de hoje, a maioria dos instrumentos musicais, ou seus componentes, são fabricados em madeira. Isso se deve ao fato de que esse material possui uma estrutura única, assim como propriedades físicas, mecânicas e acústicas excepcionais (BUCUR, 2006; WEGST, 2006; BRÉMAUD, 2012), excelente trabalhabilidade e estética agradável (FLETCHER, 1999; WEGST, 2006; BRÉMAUD, 2012).

Para mais, outro elemento que possui grande influência na seleção de um material é a distribuição geográfica da flora e, conseqüentemente, a disponibilidade da madeira na região alvo, que são fatores limitantes na produção de instrumentos musicais com diferentes materiais (FLETCHER, 1999; BRÉMAUD, et al., 2008).

Essa grande demanda por um número restrito de espécies torna insustentável sua utilização do ponto de vista econômico e ambiental (TELES, 2005). Conforme exposto, a procura por espécies alternativas para confecção de instrumentos musicais, que permitam a redução da demanda pelas madeiras comumente utilizadas para esse fim, resultará em um incentivo à exploração mais sustentável desses materiais.

2.2 Aspectos gerais da madeira que afetam seu uso

2.2.1 Teor de umidade

A madeira é um material higroscópico, ou seja, é capaz de interagir com o meio ambiente absorvendo ou perdendo umidade para ele, até mesmo depois da morte de suas células. Esta peculiaridade da madeira e de alguns outros materiais afeta sensivelmente suas propriedades físicas e mecânicas, ou seja, sua avaliação é de extrema importância para validar a qualidade da madeira de uma determinada espécie.

Segundo a ABNT NBR 7190/1997 o teor de umidade da madeira (TU) corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca. Esta variável relaciona a quantidade de água que a madeira retém dependendo da temperatura do ambiente e da umidade relativa do ar a qual está exposta. A equação 1 fornece a relação para determinação do teor de umidade da madeira:

$$TU (\%) = 100. (m1 - m2) / m2 \quad (1)$$

Em que TU % - é o teor de umidade da amostra com relação massa seca, em porcentagem; m1 - é a massa inicial úmida da amostra (g); m2 - é a massa seca em estufa (g).

A água, a partir da interação com a parede celular da madeira, poderá ser encontrada de três formas: em sua constituição, por impregnação e livre. A água presente em sua constituição está ligada quimicamente e não pode ser removida sem que haja a decomposição da madeira. A água de impregnação, podendo ser chamada também de água de adesão, está localizada entre as paredes das células, onde estão quimicamente ligadas por ligações de hidrogênio às cadeias de celulose das paredes celulares, e sua remoção culmina na aproximação entre elas, causando a retração da madeira e o respectivo aumento da resistência e volume da amostra. A água livre, também chamada de água de embebição, ocupa o lúmen das células, onde sua remoção não afeta o volume, nem as propriedades mecânicas do material. As árvores vivas, por exemplo, possuem grandes quantidades de água sob as duas formas, água de impregnação e água livre, sendo capaz de alcançar valores superiores a 200% de conteúdo de umidade, conforme sua densidade (ZIMMERMANN, 1993).

O ponto de saturação das fibras (PSF) pode ser definido como o teor de umidade da madeira no momento em que esta já perdeu toda a sua água livre (dos lumens e espaços intercelulares), porém ainda mantém as paredes celulares saturadas de umidade, ou seja, ainda permanece com a água de adesão. Sua aplicação indica um valor de umidade abaixo do qual as propriedades físicas e mecânicas da madeira serão afetadas pelo conteúdo de umidade, sendo de aproximadamente 33%, podendo variar de espécie para espécie (MANTILLA et al., 2003).

Segundo Wegst (2006) algumas propriedades são fundamentais para o desempenho acústico de uma madeira, como: densidade, módulo de elasticidade e retração, e essas propriedades são altamente dependentes do teor de umidade. O teor de umidade da madeira tem grande influência nas propriedades de resistência, rigidez, dureza, resistência à abrasão, usinagem, poder calorífico, condutividade térmica, rendimento, além da resistência da madeira contra a decomposição (KOLLMANN & COTÉ JÚNIOR, 1968). Em geral, a resistência mecânica das madeiras aumenta à medida que diminui o teor de umidade, em razão do adensamento e rigidez das paredes celulares e do aumento do material lenhoso por unidade de volume, causada pela perda de água (BELTRAME et al., 2010)

Mantilla et al. (2003) mostra que há relação existente entre a velocidade de propagação ultrassônica, a atenuação e o conteúdo de umidade existente na madeira, onde a velocidade de propagação diminui rapidamente à medida que o teor de umidade aumenta até o ponto de saturação. Bucur (1995) estudou a variação da velocidade longitudinal do ultrassom em função de vários teores de umidade, em corpos de prova da espécie *Metasequoia* (glyptostroides), constatando que a velocidade do ultrassom decresceu 21%, indo de 5200 para 4300m/s, entre os teores de umidade de 0% e 38%.

Devido a esta higroscopicidade da madeira ela está quase sempre perdendo ou ganhando umidade para atingir um estado de equilíbrio com a atmosfera. Quando isto ocorre, diz-se que a madeira está em “equilíbrio higroscópico” com o ambiente. O teor de umidade, quando a madeira atinge o equilíbrio higroscópico com o ambiente, está em função das condições

climáticas e da espécie florestal, e é conhecido como “umidade de equilíbrio da madeira” (COSTA, 2001)

Diante do exposto acima, nota-se que o teor de umidade da madeira é imprescindível para a confecção de instrumentos musicais, uma vez que há uma grande relação entre a velocidade de propagação da energia sonora na madeira e a umidade presente nela. Segundo Calegari et. al (2007) o teor de umidade da madeira influencia de forma significativa na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, sendo esta relação inversamente proporcional.

Um teor de umidade considerado adequado para construção de um instrumento musical é de aproximadamente 6%. A secagem constitui uma etapa muito importante do processamento, pois se for realizada de maneira adequada acarretará na melhoria das propriedades acústicas da madeira, garantindo assim, a melhor qualidade do produto final (MARQUES et al., 2009).

2.2.2 Densidade

A densidade, ou massa específica, da madeira é uma das propriedades físicas mais importantes a ser considerada para viabilizar a aplicabilidade desse material em diferentes setores, além de ser uma forma de classificar os diferentes tipos de madeiras e analisar sua qualidade. Segundo Oliveira e Sales (2000), o aumento da densidade propicia, para um valor de umidade constante ao longo da amostra, uma maior velocidade de propagação em qualquer das três direções da madeira. Em regra geral, madeiras pesadas são mais resistentes, elásticas e duras que as madeiras mais leves. Porém, em paralelo a estas vantagens, são de mais difícil trabalhabilidade, e apresentam maior variabilidade (MORESCHI, 2014).

A densidade pode ser descrita de duas formas mais usuais: densidade básica e densidade aparente. A densidade básica está relacionada com a massa da madeira completamente seca em estufa, já a densidade aparente é obtida através da determinação de massa e volume (que inclui o material lenhoso, extrativos, materiais estranhos e o ar contido nas células da madeira) dado um mesmo valor de umidade, onde a NBR 7190/1997 determina que a massa específica aparente se refere a amostras com umidade de 12%.

As variáveis umidade e densidade estão fortemente correlacionadas quando a finalidade é avaliar a qualidade da madeira para um determinado fim. A velocidade de propagação das ondas mecânicas tende a aumentar com a diminuição da umidade, ocorrendo de forma mais intensa abaixo do Ponto de Saturação das Fibras (PSF), devido aumento causado sobre o módulo de elasticidade com maior intensidade do que sobre a densidade aparente. Dessa forma, as maiores velocidades ultrassônicas são geralmente alcançadas em espécies de madeira de maiores densidades e menores teores de água (BUCUR, 2006).

No processo de construção de instrumentos musicais, a densidade é um dos parâmetros adotados para selecionar as madeiras adequadas para cada finalidade (MARQUES et al., 2012).

2.2.3 Retratibilidade

A retratibilidade é o fenômeno relacionado à variação dimensional que ocorre na madeira, em função da troca de umidade do material com o meio em que está inserida, até o ponto de equilíbrio higroscópico (PORTO, 2010). Isto ocorre devido a umidade da madeira atingir valores acima ou abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF 30%) (BUCUR, 1995; BUCUR et. al., 2006).

O estudo do comportamento das variações dimensionais da madeira é essencial para a sua utilização industrial. As relações existentes entre densidade, umidade, retratibilidade e expansão volumétrica são de fundamental importância para um aproveitamento mais eficiente dessa matéria-prima (REZENDE, 2003; REZENDE et al., 1995).

O instrumento musical considerado de boa qualidade requer uma boa precisão para que o som emitido por ele saia de forma adequada sem prejudicar sua afinação e, para isto, é imprescindível que a madeira utilizada esteja dimensionalmente estável. A contração e a expansão higroscópica da madeira são dois problemas muito indesejados que ocorrem durante a sua utilização (OLIVEIRA & SILVA, 2003). Estes problemas podem acarretar possíveis desmontes do material caso ocorra o inchamento ou contração da madeira, devido ao fenômeno denominado anisotropia. Ainda, Zatloukal et al. (2021) mostra que a instabilidade dimensional da madeira sob diferentes condições de umidade pode influenciar na desafinação, ou em defeitos em um piano, uma vez que o inchaço, devido ao ganho de umidade pela madeira, provoca a movimentação da mesa de som, afetando as cordas e resultando na desafinação do instrumento.

A mudança de volume da madeira verificada entre 0% U e o PSF, devido aos processos de dessorção ou de adsorção, é considerada uma de suas propriedades físicas mais importantes, afetando e limitando consideravelmente o seu uso industrial em vários ramos de utilização. O aumento de volume (inchamento) deve-se principalmente à inclusão de moléculas de água nos espaços submicroscópicos da parede celular, entre as micelas (feixes formados por moléculas de celulose) e nas suas regiões amorfas, afastando-as e, conseqüentemente, alterando as dimensões da madeira. Da mesma forma, a diminuição do volume (contração) deve-se à retirada das moléculas de água dos espaços submicroscópicos mencionados, ocasionando a aproximação das micelas e das moléculas que as constituem, e a conseqüente retração da madeira (MORESCHI, 2014)

As mudanças dimensionais na madeira podem ser observadas ao longo das três direções estruturais diferentes. Normalmente, a contração na direção tangencial é, aproximadamente, duas vezes maior do que na direção radial, e no sentido longitudinal é praticamente desprezível. Essa razão é denominada coeficiente de anisotropia, quanto mais próximo de 1 (relação T/R), menor será a incidência de defeitos como o fendilhamento e empenamento da madeira (OLIVEIRA & SILVA, 2003).

Diante desta perspectiva, é importante ressaltar que os instrumentos musicais são fabricados sob condições climáticas diversas do local onde serão utilizados, sendo um dos parâmetros a ser considerado, além da adequação do instrumento para o desempenho (DER SLOOTEN & SOUZA, 1993). À vista disso, o estudo da variação das propriedades da madeira torna-se imprescindível para tornar conhecido o seu comportamento, a fim de proporcionar o uso tecnológico adequado para esse material (VALENTE, 2013).

2.3 Componentes estruturais e não estruturais da madeira

Os componentes estruturais integram as substâncias macromoleculares que constituem a parede celular de todas as madeiras, a qual sua extração implica na utilização de processos químicos ou mecânicos, que dispõe de uma elevada quantidade de energia, alterando fundamentalmente as propriedades das células. Tais macromoléculas são: celulose, hemiceluloses e lignina. Bem como, também há os componentes não estruturais, em que faz parte das substâncias de baixo peso molecular, como por exemplo os extrativos, que por sua vez, detêm um papel importante já que estão diretamente relacionados com a durabilidade natural da madeira (OLIVEIRA et al., 2013). É possível observar a relação dos componentes da madeira na Figura 1.

De acordo com Tsoumis (1968), as proporções dos constituintes químicos variam entre as coníferas e as folhosas, visto que as coníferas contêm 40 a 45% de celulose, 25 a 35% de hemicelulose, 20% de lignina e 5 a 10% de extrativos, ao passo que as folhosas contêm 40 a 45% de celulose, 17 a 25% de hemicelulose, 15 a 35% de lignina e 5 a 10% de extrativos. Portanto, as variações nas características e no volume desses componentes e a estrutura celular

da madeira determinam as particularidades de cada espécie, influenciando em suas propriedades.

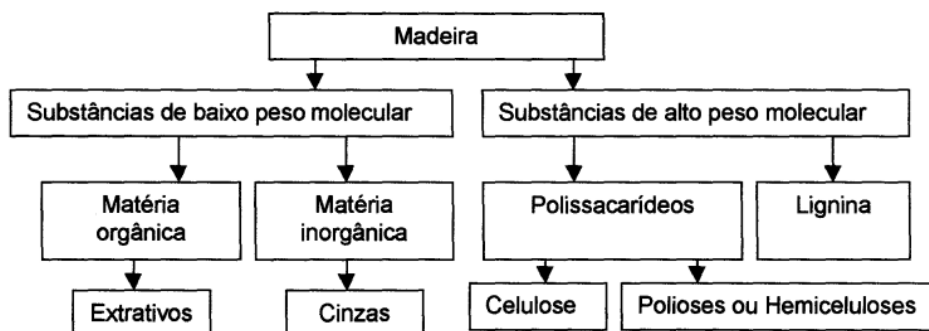


Figura 1 - Esquema geral dos componentes químicos na madeira.

Fonte: Fengel; Weneger (1989).

2.3.1 Celulose

É o componente majoritário; pode ser brevemente caracterizado como um polímero linear de alto peso molecular, constituído exclusivamente de β -D-glucose. (KLOCK et al., 2005).

Costa (2001) define celulose como um polissacarídeo linear, de alto peso molecular, não solúvel em água. Trata-se do principal componente estrutural da madeira, contida nas paredes celulares, apresentando cadeias moleculares longas e dispostas de forma linear (sem ramificações), motivo pelo qual a madeira é um material resistente (VALE et al, 2010). É caracterizada por regiões cristalinas em grande parte de seu comprimento, entrecortadas por zonas amorfas alternadas (consideradas descontinuidades fragilizantes quando se avaliam os fenômenos de ruptura da madeira sob solicitações mecânicas).

2.3.2 Hemiceluloses

Segundo Rowell et al. (2012) as hemiceluloses estão em estreita associação com a celulose e a lignina na parede celular, por ligações de hidrogênio, atuando como uma matriz para esta. Os principais constituintes das hemiceluloses são uma mistura de polímeros essencialmente lineares, com combinações complexas de hexoses (glucoses, manoses e galactose), pentoses (xilose e arabinose) e ácidos urônicos (em alguns casos).

As hemiceluloses, assim como a celulose, também é um polissacarídeo, no entanto as cadeias moleculares são mais curtas, e é constituída por diversos monômeros, e não somente a glicose (ROWELL et al., 2012).

De acordo com Costa (2001), as hemiceluloses não devem ser definidas apenas como um único composto, mas sim um conjunto de componentes poliméricos presentes em vegetais fibrosos, constituídos de uma cadeia central, à qual somam-se cadeias laterais. Além de atuarem como uma "matriz", em que estão imersas as cadeias de celulose, as hemiceluloses são os componentes mais higroscópicos das paredes celulares (PORTO, 2010). Então, as hemiceluloses são, em sua maioria, estruturas ramificadas, amorfas (não possuem regiões cristalinas), além de não serem compostos químicos definidos e possuem uma classe de componentes poliméricos combinados de formas distintas.

As folhosas, de maneira geral, contêm maior teor de hemiceluloses que as coníferas, e a composição é diferenciada (KLOCK et al, 2005).

2.3.3 Lignina

A lignina permeia tanto as paredes celulares quanto as regiões intercelulares, tornando a madeira um material rígido, capaz de resistir consideravelmente às tensões mecânicas (PARHAM & GRAY, 1984).

Assim como a celulose, a lignina também é uma macromolécula, porém as moléculas de lignina são formadas de maneira distinta dos polissacarídeos, pois é composta por um sistema aromático integrado de unidades de fenil-propano, além de ser altamente irregular em sua constituição e estrutura molecular (PORTO, 2010). Do ponto de vista morfológico, a lignina é uma substância amorfa localizada na lamela média composta, bem como na parede secundária. Durante o desenvolvimento das células, a lignina é incorporada como o último componente na parede, interpenetrando as fibrilas e, assim, fortalecendo, e enrijecendo as paredes celulares (KLOCK et al, 2005).

Sua composição química elementar é composta por carbono, hidrogênio e oxigênio, onde a composição elementar percentual varia principalmente se a lignina for obtida de coníferas ou de folhosas, em que as coníferas apresentam maior teor de lignina, variando de 28 a 36% (FENGEL & WEGENER, 1989) do que as folhosas, que varia de 26,0 a 34,2% (SANTANA & OKINO, 2007).

2.3.4 Extrativo

Junto com os componentes da parede celular, existem inúmeras substâncias que são chamadas de materiais acidentais ou estranhos da madeira. Estes são responsáveis, muitas vezes, por certas propriedades da madeira como: cheiro, gosto, cor e outros. As interações químicas da madeira que estão relacionadas à sua cor ocorrem entre suas enzimas e seus extrativos fenólicos, os principais extrativos responsáveis por essa mudança de cor são: flavonóides, quinonas, lignanas e taninos (RAPOLD & SMITH, 2004).

Os extrativos são componentes essencialmente orgânicos, e que não fazem parte dos componentes estruturais da madeira, mas são encontrados nas paredes e nos lúmens celulares (TSOUMIS, 1968). Posto que estes componentes contribuem somente com uma pequena porcentagem da massa da madeira, podem apresentar uma grande influência nas propriedades e na qualidade de processamento das madeiras (KLOCK et al, 2005).

Os extrativos são substâncias solúveis em água ou em solventes orgânicos neutros, ou seja, podem ser extraídos usando vários tipos de solventes e água, e estão presentes principalmente na casca. De baixa massa molecular e somando pequenas quantidades, eles englobam óleos essenciais, resinas, taninos, graxas e pigmentos.

Bodig e Jayne (1993) afirmam que os extrativos têm uma elevada influência sob a resistência à compressão paralela às fibras, baixo efeito na resistência à flexão, e extremamente baixo se for considerar a resistência ao choque.

2.4 Cerne e Alburno

Segundo Benjamin (2006), a principal função do lenho é transportar a seiva da raiz até as folhas da árvore. Porém, tal função não ocorre ininterruptamente, pois durante o crescimento da árvore, as células são bloqueadas por tiloses ou devido a deposição de extrativos. A partir deste ponto, as células param de conduzir a seiva e passam a ser depósito de extrativos.

O cerne é a parte interna do tronco, e sua formação deve-se ao acúmulo de excedentes de produtos fotossintetizados, levando à perda de condutibilidade dos tecidos mais internos do tronco, e à concentração de um elevado teor de extrativos nessa região, em vista disso tem a

coloração mais escura (JOIA et al, 2006). Em algumas espécies, essa diferença de coloração não existe, impossibilitando a sua identificação por essa via. Nesses casos, a identificação requer uma análise das diferenças a nível químico, ou pela observação de estruturas anatômicas.

Já o alburno representa, juntamente com o câmbio, a parte de maior atividade fisiológica no tronco, em que as células condutoras das zonas mais externas participam ativamente do transporte ascendente de líquidos na árvore, e suas células parenquimáticas vivas contêm substâncias nutritivas (amido, açúcares, proteínas, etc.). Estes, em parte, são os responsáveis pela maior suscetibilidade do alburno ao ataque xilófagos (BURGER & RICHTER, 1991).

A transformação de alburno para o cerne ocorre no decorrer da vida da árvore, ou seja, a cada ano que surge as camadas de alburno são transformadas gradativamente em cerne e, com isso, novos alburnos se formam nas camadas externas, próximas ao câmbio, da árvore. A diferenciação de cerne para alburno, em algumas espécies, pode ser notada visualmente, por causa do escurecimento do lenho, apesar de não ser determinante para o surgimento do cerne, causado pela deposição dos extrativos que lhe dão, às vezes, maior resistência contra a deterioração, devida ação de fungos ou insetos (NOGUEIRA, 2007). Na Figura 2 é possível localizar o cerne e o alburno no tronco de uma árvore.

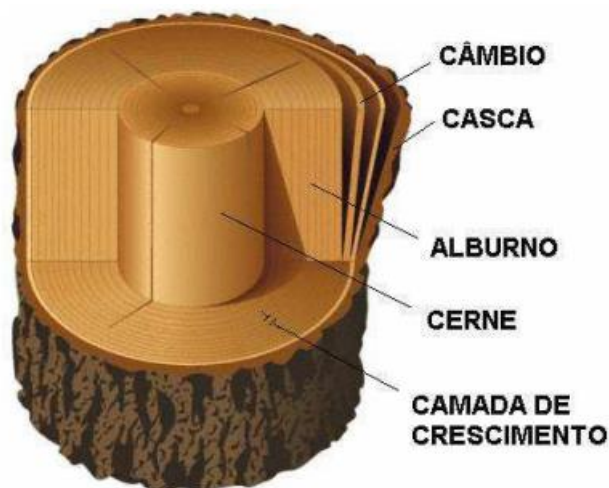


Figura 2 - Seção transversal do tronco
Fonte: Costa (2001).

2.5 Processos de modificações da madeira

Devido a sensibilidade da madeira com relação às variações de umidade, ou seja, sua higroscopicidade, alguns autores como Yano et. al. (1994), Chang et. al. (2000), Moura e Brito (2011), Lima (2015) e Sandberg et al. (2017) avaliaram o comportamento da madeira após utilização de métodos de tratamentos térmicos, químicos e impregnação, a fim de melhorar as características físicas, mecânicas e acústicas das espécies avaliadas.

A partir das análises sobre as possíveis modificações da madeira tratada termicamente, Quirino e Vale (2002) explicaram que a maior estabilidade deste material advém da redução da higroscopicidade presente madeira, ou seja, na diminuição da sua capacidade de absorver água do meio ambiente, pela degradação do constituinte mais hidrófilo, as hemiceluloses. Frente à elevação da temperatura, a degradação ocorre primeiro com as hemiceluloses, seguido da celulose e, por fim, da lignina. Observa-se que a degradação da lignina é mais lenta, ao contrário das hemiceluloses e da celulose (STAMM, 1964; PENEDO, 1982), em que as hemiceluloses degradam com mais facilidade devido a sua natureza amorfa e, por isso, menos estável. Severo et al. (2001) ressaltam em seu estudo que os corpos-de-prova vaporizados não apresentaram o

mesmo teor de umidade de equilíbrio dos corpos-de-prova controle, após o condicionamento em ambiente com temperatura de 21°C e umidade relativa de 65%, fomentando, assim, a eficiência do tratamento térmico para fins de estabilização dimensional da madeira.

Além disso, Sandberg et al. (2017) também relata em seu estudo que a modificação da madeira pode envolver processos de modificações que resultam em uma mudança da natureza química do material, ou seja, uma reação química de um reagente com polímeros de hidroxila da parede celular (acetilação, furfurilação e outros), denominada de modificação ativa, ou uma modificação passiva, na qual há uma mudança nos resultados das propriedades da madeira, porém sem alterar a composição química do material. Esta modificação passiva inclui a impregnação da parede celular com um monômero, que é subsequentemente polimerizado in situ, ou seja, vai atuar aumentando o volume da parede celular ou impregnando os lúmens das células. Hill (2006) também relata que nesse processo, de modificação por impregnação, ocorre a impregnação da parede celular da madeira com algum produto químico, ou uma combinação de produtos químicos, que reagem para formar um material que está confinado dentro da parede celular.

Dito isso, a finalidade do presente estudo é que a modificação por impregnação de extrativos de *Paubrasilia echinata* na madeira de *Pinus* preencha o vazio celular, ou faça as ligações químicas na parede celular (na celulose, hemiceluloses e lignina).

2.6 Acústica

2.6.1 Som

O som pode ser definido como uma energia que se propaga, por meio de ondas mecânicas transversais e longitudinais, de maneira elástica. Esse fenômeno físico é composto pela fonte de vibração, meio de transmissão e recepção do ouvinte (ROEDERER, 1998; WOOD, 2013). O aspecto de recepção do som geralmente é atribuído a um ouvinte humano, o que torna necessária a compreensão do órgão responsável pela audição e como tal informação é processada no cérebro. As oscilações são captadas pelo tímpano e transmitidas para os ossículos presentes no ouvido médio. A seguir, essas vibrações são transduzidas ao ouvido interno (cóclea), onde células ciliadas classificam as frequências captadas e produzem impulsos nervosos elétricos. Tais sinais são conduzidos ao sistema nervoso auditivo o qual é responsável pelo registro dos sons na memória do indivíduo e por respostas psicoacústicas (ROEDERER, 1998).

O meio de propagação é um dos aspectos mais importantes do som, em razão de que tal energia só pode ser transmitida em um meio físico, seja este sólido, líquido ou gasoso. A fonte do som é composta por um mecanismo de excitação primária, que provê a energia inicial para o sistema, e pelo elemento vibrante fundamental, e fornece os harmônicos superiores necessários. Além desses componentes, alguns instrumentos musicais possuem um ressonador adicional, que auxilia o elemento vibrante primário na conversão de energia e confere o timbre final ao som (ROEDERER, 1998).

Algumas madeiras têm a capacidade de absorver melhor o som, enquanto outras de refleti-lo com mais facilidade, isso tem como consequência uma maior ou menor sustentação do som produzido, assim como um timbre diferenciado para o grave ou para o agudo, ou ainda se o som é mais estridente ou aveludado (COUTO, 2006). Segundo Bucur (2006) a absorção acústica da madeira e sua eficiência de reflexão sonora se relacionam fortemente em todo espectro sonoro, com a estrutura interna do material, o tratamento de superfície, e de qual tipo de montagem e geometria.

2.6.2 Frequência natural de ressonância, atenuação acústica e decaimento logarítmico (DI)

As propriedades acústicas das madeiras podem ser obtidas através de diferentes métodos não destrutivos. Dentre eles destacam-se o método de vibração, que tem como principal parâmetro a frequência de ressonância, e o método com ultrassom, que tem como principal parâmetro a velocidade de propagação sonora (Bucur, 2016).

A frequência fundamental é aquela obtida pelo primeiro maior pico no espectro das frequências de ressonância, sendo os demais picos considerados como o conjunto de harmônicos que possuem uma relação direta com a frequência fundamental (Henrique, 2009). O timbre e a qualidade do som produzidos por um instrumento musical em vibração depende do conjunto das frequências de ressonâncias geradas (Bucur, 2016).

A Atenuação Acústica pode ser determinada, no domínio do tempo, através do amortecimento por Decaimento Logarítmico (DI) ($\lambda = \pi \tan \delta$). Em que, é registrado a resposta de frequência do sistema, levando em conta a atenuação da resposta acústica do material, após uma excitação pelo impulso gerado, sendo calculada através da razão entre duas amplitudes sucessivas do sinal no domínio do tempo (BRÉMAUD et al., 2012).

De acordo com Teles et al. (2018) um dos parâmetros acústicos mais importantes é o decaimento logarítmico (DI). A proporção da amplitude entre o som fundamental em relação à amplitude dos seus harmônicos define o valor do decaimento logarítmico.

2.7 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas da madeira são geralmente apuradas pela sua resistência e rigidez contra as forças externas, variando de espécie para espécie (LEITE et al., 2012). Dentre essas propriedades, destacam-se a resistência à compressão, flexão, tração, cisalhamento, fendilhamento e dureza (ABNT, 1997). Em que a flexão, sem dúvidas, é a forma mais comum em que uma peça de madeira é submetida, e é a propriedade mecânica que melhor se relaciona com as outras (ROCHA et al., 1988).

Uma madeira, a fim de ser considerada apta para a construção de determinadas partes de um instrumento musical, deve apresentar resistência a grandes tensões (como as exercidas pelas cordas, de aproximadamente 40kgf). Caso isso não aconteça, o resultado poderá acarretar em deformações, como empenamentos do braço de um instrumento, no formato de um arco (SOARES, 2014). Além de dificultar a execução musical no instrumento, ainda poderá resultar em um instrumento desafinado (COUTO, 2006).

2.7.1 Módulo de elasticidade dinâmico (E_{din})

Para a construção de estruturas em madeira, devemos conhecer bem as propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados, como teor de umidade, densidade, coeficiente de anisotropia, resistência ao fogo, compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento e módulo de elasticidade (GESUALDO, 2003; ABNT, 1997).

O MOE é uma medida da rigidez limite de deformação elástica do material (MORA et al., 2009). Sendo um corpo sólido é chamado elástico quando após à aplicação de uma carga abaixo do limite proporcional, a deformação produzida é completamente recuperada após o relaxamento dessa carga; além desse limite, as deformações plásticas sofridas são irreversíveis (KOLLMANN & COTÉ JÚNIOR, 1968).

Existem três módulos de elasticidade ao longo dos eixos da madeira, longitudinal, radial e tangencial; estes módulos são obtidos a partir de testes de compressão, ou por frequência de ressonância (COSTA, 2017). Essas relações elásticas e as constantes elásticas variam dentro e

entre as espécies, juntamente com o teor de umidade e a massa específica do material (KRETSCHMANN, 2010).

Ao considerar a propagação de uma onda mecânica em um meio sólido, a velocidade de propagação depende das condições mecânicas do meio, isto é, das propriedades elásticas do meio, como o módulo de elasticidade (E), e a densidade (ρ) do meio em que a onda está se propagando (ALONSO & FINN, 2015).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Produção e mensuração dos corpos-de-prova

A partir de tábuas em corte radial de *Pinus caribaea var. caribaea* foram retirados corpos-de-prova radiais, isentos de defeitos, medindo 200 mm de comprimento, 30 mm de largura e 5 mm de espessura.

E então, foram separados em lenho de cerne e alburno, de acordo com as características anatômicas visuais, considerando as possíveis diferenças entre os dois tipos de lenhos. Ademais, as amostras foram selecionadas sem a presença de nós, desvio e inclinação de grã acentuada, e com alto teor de resina aparente. A diferenciação entre cerne e alburno foi feita pela coloração da madeira, olhando desde a medula até a região da casca, assim como o distanciamento dos anéis de crescimento.

Sendo assim, foram separadas 20 amostras de cerne denominadas de PLC e 20 amostras de alburno denominadas de PLA (Figura 3), que em seguida foram acondicionadas em ambiente de laboratório (25 °C e 65% de UR) por 60 dias para atingir a umidade de equilíbrio com o ambiente. Após selecionadas, as amostras foram mensuradas com paquímetro digital em 3 pontos, no comprimento e largura, e espessura, em que neste último caso com micrômetro digital. Os valores de comprimento, largura e espessura foram, portanto, representados pelos valores médios das três medições. Em seguida, foi realizada a pesagem em balança analítica com precisão de 4 casas decimais, com o objetivo de se obter o volume e a densidade aparente, e tornar possível o acompanhamento do ganho de peso absoluto e relativo, além do teor de umidade.



Figura 3 - Amostras selecionadas e marcadas após mensuração
Fonte: Próprio autor (2020).

3.2 Pré-teste de absorção de água

O Pré teste foi feito para se acompanhar e conhecer a taxa de absorção de água em função do tempo, com a aplicação de vácuo.

Assim, as amostras extras foram mergulhadas em água destilada, e levadas a vácuos sucessivos em intervalos de tempo de aproximadamente 30 minutos. Após cada sessão de vácuo as amostras foram retiradas do recipiente com água, sendo removido o excesso de umidade com papel toalha e pesadas de imediato. Após cada pesagem, um novo vácuo foi aplicado, totalizando 4 ciclos de vácuo.

De posse desses dados foi possível criar uma curva de absorção de água, de modo a obter o tempo necessário para a absorção de água pelas amostras de madeira em função do tempo, e este instrumento servir, posteriormente, para compreender o tempo de vácuo para o tratamento das amostras e expectativa do teor de extrativos inserido nas madeiras.

3.3 Produção de extrativos

Os extrativos de Pau-brasil usados nesta pesquisa foram retirados da madeira de uma árvore de *Caesalpinia echinata* que se encontrava na entrada do pavilhão principal da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Esta árvore, como mostra a Figura 4, caiu na data de 19 de fevereiro de 2019, após fortes ventos e chuva no campus.



Figura 4 - Queda da árvore de Pau-brasil (*Caesalpinia echinata*) em frente ao Pavilhão principal (P1) da UFRRJ
Fonte: Conservação de Parques e Jardins/ UFRRJ e Coordenadoria de Comunicação Social/UFRRJ (2019).

A partir disso, foram retirados discos da árvore, em que desses discos foram separados cerne de alburno com serra de fita no Laboratório de resíduos. Os discos passaram por desengrosso e plaina, a fim de se obterem maravalhas. Estas maravalhas passaram por um moinho de facas, e o pó resultante foi direcionado a peneiras de 60 e 40 mesh. O pó retido na peneira de 60 mesh foi ensacado em um cartucho de papel filtro.

Dito isso, as soluções foram preparadas após a extração dos extrativos de *Paubrasilia echinata* da madeira moída, em que o cartucho contendo o pó resultante foi direcionado ao Soxhlet, na temperatura de 60 graus por um período de 12 horas, que por condensação resultou em uma solução de água + extrativos (Figura 5).



Figura 5 - Extrator Soxhlet e cartucho com pó de Pau-brasil (*Caesalpinia echinata*)
Fonte: Laudares (2019).

Após a obtenção desta solução, ela foi levada a um Rotavapor (Figura 6), sendo a água aquecida a uma temperatura de 40°C e submetida a vácuo, passando pelo processo de evaporação apenas da água, obtendo, assim, uma solução com maior concentração de extrativos, mas que ainda contém água.



Figura 6 - Rotavapor com a solução de extrativo de Pau-brasil (*Caesalpinia echinata*)
Fonte: Laudares (2019).

Após isso, essa solução foi armazenada em tubos Falcon e levadas ao laboratório de biologia, para o processo de Liofilização (Figura 7), onde pelo método de sublimação com temperaturas negativas e com vácuo, a solução foi congelada e, assim, o restante de água contida nas amostras passou do estado sólido para o estado gasoso, restando apenas o extrativo solúvel, ou seja, livre de água. Este processo foi realizado com o objetivo de facilitar o controle da concentração da solução durante todo o processo.



Figura 7 - Extrativos em tubos Falcon para o processo de Liofilização
Fonte: Próprio autor (2020).



Figura 8 - Pó de extrativos de Pau-brasil (*Caesalpinia echinata*) liofilizados
Fonte: Laudares (2019).

Ademais, a partir do pó do extrativo de Pau-Brasil liofilizados (Figura 8), as soluções foram preparadas a uma concentração de 2% em cada ciclo de inserção, e homogeneizadas com o auxílio de um agitador magnético durante alguns minutos, antes do contato da solução com a madeira de *Pinus caribaea var. caribaea*. Para isso, foi utilizado uma balança Shimadzu, modelo AUY 220, em que foi medida a massa de cinco cotas, de 2 ml de solução de extrativos

de Pau-brasil, em pequenos frascos de vidro, antes e após cada ciclo (Figura 9). Estes frascos foram pesados com e sem a solução, e após secos em estufa ($103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) foram pesados novamente. Com a retirada do valor da massa dos frascos (vidros), a massa restante corresponde somente ao extrativo.



Figura 9 - Cotas retiradas das soluções, antes e após o ciclo de inserção
Fonte: Laudares (2019).

3.4 Metodologia de avaliação acústica

As avaliações acústicas foram realizadas pelo método de vibração acústica, com impactos transversais ao comprimento das amostras. Então, foram separadas 20 amostras de cerne e alburno não tratadas denominadas PLC e PLA, respectivamente, e através de um dispositivo eletromecânico desenvolvido no Laboratório de Modificação Físico-Química da UFRRJ. Este equipamento encontra-se em processo de patente. Na Figura 10, está representado um equipamento similar comumente utilizado para tal fim.

Então, foram realizados leves impactos transversais no comprimento das amostras (dez repetições), cuja vibração resultante foi captada por um microfone comum conectado à um computador com placa de som. Este sinal foi analisado pelo software Fast Fourier Analyzer (FTT Analyzer) desenvolvido e disponibilizado pela FAKOPP ® Enterprize, obtendo-se assim a frequência natural de ressonância e o decaimento logarítmico (DI).

Nos ensaios de vibração transversal também se obteve o Módulo de Elasticidade Dinâmico (ASTM, 2015), conforme a Equação 2:

$$E_{din} = 0.9465 \left(\frac{mf_f}{b} \right)^2 \frac{L^3}{t^3} T_1 \quad (2)$$

Em que E_{din} é o módulo de young ou módulo de elasticidade dinâmico; m é a massa do corpo de prova, em g; b é a largura da amostra, em mm; L é o comprimento da amostra, em

mm; t é a espessura da amostra, em mm; f_f é a frequência natural de ressonância, em Hz; T_1 é o fator de correção de Pickett para o modo de flexão fundamental.

A Atenuação Acústica pode ser determinada, no domínio do tempo, através do amortecimento por Decaimento Logarítmico (DL) ($\lambda = \pi \tan \delta$). O DL é representado conforme a Equação 3:

$$DL = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} \approx \pi \times \tan \delta \quad (3)$$

Em que DL é o decaimento/decremento logarítmico; A_0 e A_n são as amplitudes sucessivas.

Além disso, também foi obtida a Eficiência de Conversão Acústica (ECA) das amostras através da Equação 4:

$$ECA = \frac{\sqrt{\frac{E_{din}}{\rho^3}}}{\tan \delta} \quad (4)$$

Em que ECA é a eficiência da conversão acústica; E_{din} é o módulo dinâmico; ρ é a densidade aparente; e $\tan \delta$ é o coeficiente de amortecimento; $\pi = 3,1416$.

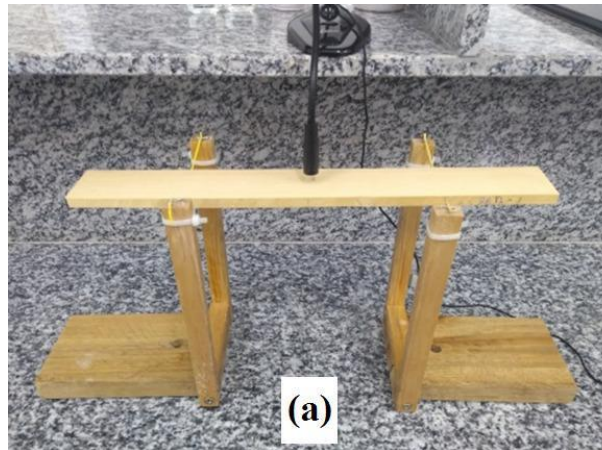


Figura 10 - Simulação do equipamento utilizado para os ensaios de vibração transversal.

Fonte: Laudares (2022).

3.5 Lixiviação nas amostras de alburno e inserção de extrativos

Após a obtenção dos dados nos testes de absorção de água, foi calculada a expectativa de retenção de extrativos nas amostras de cerne e alburno. Tendo em vista o diferente comportamento apresentado entre os dois tipos de madeira no teste de absorção de água, espera-se que as quantidades de extrativos retidas no interior das amostras também sejam diferentes entre si. Portanto, devido a estes fatores, e dos resultados provenientes da avaliação acústica das amostras de cerne e alburno, além da limitação da disponibilidade de extrativos de Pau-brasil para a presente pesquisa, o prosseguimento da inserção de extrativos deu-se apenas para amostras de alburno.

Sendo assim, 4 ciclos de absorção de água sob vácuo foram realizados em 5 amostras de cerne e de alburno para se obter os teores de umidade das amostras após dois ciclos de 20 minutos.

Dessa forma, seguiu-se para a impregnação das amostras por extrativos. Então, as amostras de alburno foram pesadas e mergulhadas na solução água-extrativo em uma proveta adaptada (Figura 11), para receber vácuo com 700 mm de Hg, por um período de 40 minutos, que foi o tempo necessário para otimizar a inserção de água-extrativos.



Figura 11 - Amostras inseridas na proveta para receber vácuo com 700 mm de Hg, por um período de 40 minutos. **Fonte:** Próprio autor (2020).

Após o período, as amostras foram pesadas, e foi novamente calculado o teor de umidade do material, e pela diferença de massa foi obtida a quantidade de água inserida nos corpos de prova. Considerando a concentração da solução e a quantidade de água foi estimado a quantidade em gramas de extrativos inseridos em cada amostra, além da retenção relativa à massa seca de cada amostra. Posto isso, por diferença de massa das amostras após o equilíbrio delas na umidade de equilíbrio da madeira foi confirmado o nível de inserção de extrativos. Para atingir a umidade de equilíbrio, prosseguiram para a câmara de climatização, em que desta forma permaneceram até atingirem massa constante.

Em seguida, foram submetidas ao teste de vibração transversal para verificar as mudanças no desempenho acústico das amostras de alburno, determinadas pela obtenção dos valores de frequência natural de ressonância, decaimento logarítmico, módulo de elasticidade dinâmico e a eficiência da conversão acústica.



Figura 12 - Amostras após a inserção dos quatro ciclos de extrativos
Fonte: Próprio autor (2020).

3.6 Análise Estatística

Com os valores médios obtidos da densidade aparente, módulo de elasticidade dinâmico, atenuação acústica e eficiência acústica, foi aplicado o teste t para comparar as médias obtidas das amostras não tratadas de cerne e alburno, assim como aquelas que passaram por tratamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de absorção de água para amostras de cerne e alburno da madeira de *Pinus caribaea* são apresentados na Figura 8. Com esses dados, é possível perceber que a partir de 40 minutos a quantidade de água destilada absorvida pelo material praticamente estabiliza, resultando em um teor de umidade de 83,2% para amostras de cerne e 118,9% para amostras de alburno. A posterior manutenção do vácuo por um período maior não gera um incremento significativo no teor de umidade do material, como pode ser notado pela tendência horizontal da curva de absorção em relação ao eixo horizontal, tanto para cerne quanto para alburno. Deste modo, foi estabelecido que o tempo ideal para tratar a madeira em vácuo intermitente a 700 mm de Hg é de 40 minutos.

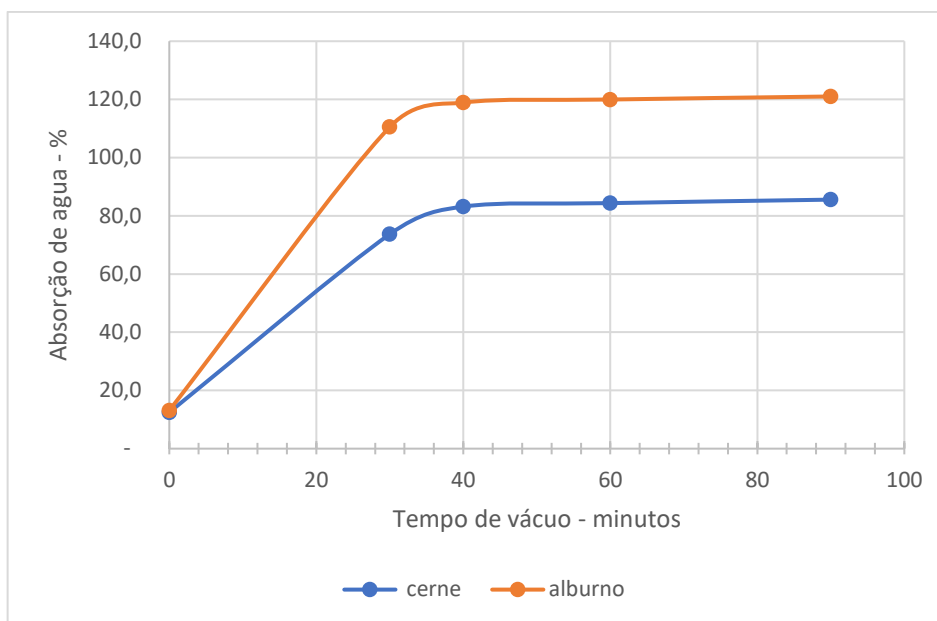


Figura 13 - Incremento da absorção de água da madeira de cerne e alburno, em função do tempo acumulado de vácuo.

Fonte: Próprio autor (2020).

Com os dados da Tabela 1, que compara madeira de cerne e alburno sem tratamento, é possível perceber que há diferença estatística significativa entre estas amostras, levando em consideração a análise dos testes acústicos. Em que, a madeira de alburno resultou em uma frequência natural de ressonância de 623 Hz, um módulo de elasticidade dinâmico de 13,9 GPa, além do decaimento logarítmico que foi de 24,0, já as amostras de cerne resultaram na frequência natural de ressonância de 573 Hz, no módulo de elasticidade dinâmico de 11,2 GPa, e o decaimento logarítmico de 26,4.

É possível observar, que os lenhos de alburno apresentaram a frequência natural de ressonância e módulo de elasticidade dinâmico maiores que os lenhos de cerne, indicativos esses que refletem em melhores propriedades acústicas e mecânicas, respectivamente. Ou seja, em madeiras com características mais ressonantes, e melhor aproveitadas para fins acústicos. Pois, segundo Wegst (2006) a velocidade de propagação sonora possui uma relação direta com o módulo de elasticidade.

O decaimento logarítmico, para os lenhos de cerne apresentou valor de 26,4, enquanto para os lenhos de alburno foi de 24,0. Para seleção de madeiras para instrumentos musicais é desejável que o coeficiente de amortecimento seja baixo (Bucur, 2016), ou seja, neste caso o ideal é que o valor de DL seja menor, indicando que a resposta acústica da madeira de alburno foi melhor do que a de cerne.

Para a análise de densidade aparente não houve diferença significativa entre as amostras de cerne e alburno, obtendo-se uma média de 537 kg/m³.

Tabela 1 - Resultados da análise física, e dos testes acústicos da madeira sem tratamento: lenhos de cerne e alburno.

Tipo de lenho	Densidade aparente (kg/m ³)	Frequência natural de ressonância (Hz)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Decaimento logarítmico (x 10 ⁻³)
Alburno (20)	547	623 ^a	13,9 ^a	24,0 ^a
Cerne (20)	527	573 ^b	11,2 ^b	26,4 ^b
Média	537	598	12,6	25,2

letras minúsculas distintas: diferença estatística pelo teste “t”, com 5% de probabilidade.

A Tabela 2 mostra os resultados das propriedades acústicas das madeiras de alburno controle, e tratadas por lixiviação e por inserção de extrativos. Com relação ao parâmetro de frequência natural de ressonância, não foram observadas diferenças significativas entre os diferentes tratamentos, com valor médio de 629 Hz. Já o decaimento logarítmico foi afetado pela lixiviação e pela inserção de extrativos na madeira, reduzindo em 8,3% e 33,3%, respectivamente, quando considerado o controle como referência. As propriedades vibracionais da madeira podem ser afetadas por vários parâmetros, sendo os extrativos um dos mais importantes (Golpayegani et al., 2012). A influência dos extrativos está relacionada ao decaimento vibracional da madeira produzindo um baixo coeficiente de amortecimento (Matsunaga et al., 1999; Wegst, 2006; Brémaud et al., 2011).

A eficiência da conversão acústica (ECA) aumentou de forma significativa nas madeiras lixiviadas e inseridas com extrativos, em 11,7% e 48,3%, respectivamente. Resultado esse esperado, pois a extração de extrativos de madeiras como o pau-brasil, e sua impregnação em outras espécies, no intuito de melhorar suas propriedades acústicas, tem sido estudada por vários autores, cujos resultados demonstram um incremento na qualidade sonora das espécies impregnadas com esses extrativos (Matsunaga et al., 1999; Alves et al., 2008; Kirker et al., 2013).

Os resultados do teste acústico realizados nas amostras de cerne e alburno da madeira de *Pinus caribae* são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 2 - Resultados das propriedades acústicas das madeiras de alburno tratadas por lixiviação e inserção de extrativos, e as amostras de controle.

Tratamentos	Frequência natural de ressonância (Hz)		Decaimento logarítmico (x 10 ⁻³)			ECA		
	Média	Desvio padrão	Média	Delta	Desvio padrão	Média	Delta	Desvio padrão
Controle	634 ^a	12,4	24,0 ^a	0,00	1,30	3750 ^a	0,00	227
Lixiviada	619 ^a	12,4	22,0 ^b	- 8,3	0,90	4189 ^b	11,7	148
Com extrativos*	633 ^a	11,0	16,0 ^c	-33,3	0,69	5561 ^c	48,3	309
Média	629		20,7			4500		

Delta é a variação percentual, positiva ou negativa, considerando o valor das amostras controle.

*. Aferidos após o quarto ciclo de inserção. ECA é a eficiência da conversão acústica.

Na tabela 3 nota-se que não foi observada diferença significativa no módulo de elasticidade dinâmico nos diferentes tratamentos de lixiviação e impregnação com extrativos

se comparado as amostras controle, apresentando assim, uma média de 14,4 GPa, de forma que os tratamentos não afetaram à rigidez da madeira de alburno.

Também, é possível observar que a lixiviação reduziu a densidade aparente da madeira de alburno de 555 kg/m³, considerando as amostras controle, para 535 kg/m³, resultado esse que era esperado devido a água atuar como um solvente, que remove os extrativos e hemiceluloses (devido ao seu caráter hidrofílico), sendo a perda de alguns desses compostos capazes de modificar as propriedades físico-mecânicas da madeira (OBATAYA et al. 1999, 2000). Enquanto a inserção de extrativos trouxe aumento não significativo, obtendo-se uma média de 554 kg/m³.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas e físicas da madeira de alburno, natural e tratadas.

Tratamentos	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)		Densidade (kg/m ³)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Controle	14,3 ^a	0,99	555 ^b	16,90
Lixiviada	13,5 ^a	1,27	535 ^a	16,52
Com extrativos	15,4 ^a	1,41	573 ^b	16,56
Média	14,4		554	

letras minúsculas distintas: diferença estatística pelo teste “t”, com 5% de probabilidade.

A tabela 4 mostra a concentração de extrativos cumulativo após cada ciclo de impregnação, ou seja, no quarto ciclo tem-se a introdução de 6,5% de extrativos em relação a massa seca da amostra. Então, observa-se que ao final do quarto ciclo, há introdução de 0,23 g de extrativo por amostra, bem como a entrada de 14,89 g de água por amostra.

Tabela 4 - Concentração cumulativo de extrativos após cada ciclo de impregnação.

Ciclos	Concentração Solução g/ml	Massa (g)		*Inserção de Extrativos- %
		Água	Extrativos	
1º Ciclo	0,0172	15,49	0,27	1,8
2º Ciclo	0,0146	12,46	0,18	3,1
3º Ciclo	0,0162	16,20	0,26	4,9
4º Ciclo	0,0157	14,89	0,23	6,5

*Inserção cumulativa

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados podemos concluir que:

1. Alburno de madeira de *Pinus caribaea var. caribaea* apresentou menor decaimento logarítmico (atenuação acústica) que a do lenho de cerne, bem como maior frequência natural de ressonância e módulo de elasticidade dinâmico.
2. Para a análise de densidade aparente não houve diferença significativa entre as amostras de cerne e alburno, obtendo-se uma média de 537 kg/m³.
3. O ato de lixiviar a madeira de pinus melhorou sua eficiência acústica em 11,7%, além de promover a redução de 8,3% da atenuação acústica.
4. A técnica de inserção de extrativos melhorou as propriedades acústicas da madeira, com aumento da eficiência acústica (em 48,3%) e, conseqüentemente, com a redução da atenuação acústica (33,3%).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p.
- ASTM – Standard Test Method. **ASTM-E1876**: Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. Estados Unidos: ASTM, 2015. 17 p.
- ALONSO, M. & FINN, E. **Física, um curso universitário**. v.2 São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2015.
- ALVES, E.S.; LONGUI, E.L.; AMANO, E. Pernambuco Wood (*Caesalpinia echinata*) Used in the Manufacture of Bows for String Instruments. **IWA Journal**. Vol.29(3):323- 335. 2008.
- BALLARIN, A. W. & PALMA, H. A. L. **Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de Pinus taeda L**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.371-380, 2003.
- BARILLARI, C. T.; JANKOWSKY, I. P.; FREITAS, V. de P. Durabilidade da madeira do gênero *Pinus* spp. tratada com CCA tipo A e CCB após 21 anos de exposição em campo de apodrecimento. **Floresta**, Edição Especial: Curitiba. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, p. 87-91, 2002.
- BELTRAME, R.; GATTO, D.; MODES, K. S.; STANGERLIN, D. M.; TREVISAN, R.; HASELEIN, C. R. **Resistência ao impacto da madeira de açoita-cavalo em diferentes condições de umidade**. Revista Cerne, Lavras, v.16, n.4, p. 499-504, 2010.
- BENJAMIN, C. A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Corymbia (Eucalyptus) citriodora e Eucalyptus grandis**. 2006. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. Malabar: Krieger, 1993. 712 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portaria nº 148 de 7 de junho de 2022 Altera os Anexos da Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014, da Portaria nº 444, de 17 de dezembro de 2014, e da Portaria nº 445, de 17 de dezembro de 2014, referentes à atualização da Lista Nacional de Espécies Ameaçadas de Extinção. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 108, p. 1-74.
- BRÉMAUD, I.; AMUSANT, N.; MINATO, K.; GRIL, J.; THIBAUT, B. Effect of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.). **Wood Science and Technology**, Springer Verlag, v. 45, n. 3, p. 461-472, 2011.
- BRÉMAUD, I. et al. **Vibrational properties of tropical woods with historical uses in musical instruments**. International Conference of COST Action IE0601 Wood Science for the Preservation of Cultural Heritage. Braga, Portugal, p. 17-23, 2008.
- BRÉMAUD, I. et al. Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types. **Annals of Forest Science**, Springer-Verlag, France, v. 69, p. 373-386, 2012.
- BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1995, 284 p.
- BUCUR, V. **Handbook of Materials for String Musical Instruments**. Springer. Melbourne, Austrália. 2016.
- BUCUR, V. **Theory of and experimental methods for acoustic characterization of wood**. Acoustics of wood. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2006, p. 39-104.
- BURGER, L. M. & RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Editora Nobel, 1991.
- CALEGARI, L.; STANGERLIN, D. M.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; LONGHI, S. J.; CARMO, P. I. O.; FIHO, L. C. P. S.; GATTO, D. A. Monitoramento do teor de umidade de

madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultra-som. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.17, n.4, p.399-408, 2007.

CARVALHO, W.; CANILHA, L.; FERRAZ, A.; MILAGRES, A. M. F. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, Lorena, v. 32, n. 8, p. 2191-2195, 2009.

CHANG, S., CHANG, H., HUANY, Y. AND HSU, F. Effects of Chemical Modification Reagents on Acoustic Properties of Wood. **De Gruyter, Holzforschung**, v. 54, p. 669-675, 2000.

COSTA, A. F. da; VALE, A. T. do; GONÇALVES, J. C. Eficiência de um resíduo de origem petrolífera sobre a estabilidade dimensional da madeira de *Pinus sp.* (pinus) e *Mimosa scabrella* Bentham (bracatinga). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 59-70, 2001.

COSTA, A. **Coletânea de anatomia da madeira**. 2001, 42 p.

COSTA, J. A. **CLASSIFICAÇÃO DE MADEIRAS DA AMAZÔNIA PARA COMPOSIÇÃO DE INSTRUMENTO MUSICAL DE CORDA ATRAVÉS DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO**. 2017. Tese (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

COUTO, A. L. M. **FÍSICA DO VIOLÃO: Análise Qualitativa do Som de Violões**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Física) - Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2006.

SLOOTEN, H. J. V. der; SOUZA, M. R. de. **Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para a manufatura de instrumentos musicais**. Amazônia, 1993. INPA. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/5432>. Acesso em: 30 nov. 2022.

FENGEL, D. E.; WEGENER, G. **Wood chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: Water de Gruyter, 1989. 613p.

FLETCHER, N. Materials for Musical Instruments. **Acoustics Australia**, Canberra, v. 27, n. 1, p. 5- 9, 1999.

GOLPAYEGANI, A.; BRÉMAUD, I.; GRILL, J.; THÉVENON, M.F. Effect of Extractions on Dynamic Mechanical Properties of White Mulberry (*Morus alba*). **Journal Wood Science**, v. 58, p.153-162, 2012.

GALVÃO, A. P. M. & JANKOWSKY, I. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 112p.

GESUALDO, F. A. R. **Notas de Aula de Estruturas de Madeira**. Uberlândia, 2003. Disponível em: http://usuarios.upf.br/~zacarias/Notas_de_Aula_Madeiras.pdf. Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

HENRIQUE, L.L. **Acústica Musical**. Fundação Calouste Gulbenkian. 3ª edição. Lisboa. 2009.

HILL, C. A. S. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. Bangor: John Wiley & Sons, 2006.

HUMMEL, A. C., ALVES, M. V. S., PEREIRA, D., VERÍSSIMO, A., SANTOS, D. **A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receita e mercados**. Belém, 2010. Serviço Florestal Brasileiro (SFB), Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon). Disponível em: <https://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/livretos/a-atividade-madeireira-na-amazonia-brasileira.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2022.

IBGE. **Mapa de Biomas do Brasil, primeira aproximação**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 02 dezembro de 2022.

JOIA, H. A.; FONSECA, T.; SILVA, M. E.; MARQUES, C. P. **Avaliação por métodos não destrutivos do diâmetro de cerne à altura do peito em eucalipto e em choupo**. **Revista Cerne**, Lavras, v. 12, n. 4, p. 309-313, 2006.

KIRKER, G.T.; BLODGET, A.B.; ARANGO, R.A.; LEBOW, P.K.; CLAUSEN, C.A. The Role of Extractives in Naturally Durable Wood Species. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 82, p. 53-58, 2013.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da Madeira**. 3. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de engenharia e tecnologia florestal, 2005.

KOLLMANN, F. R.; COTÉ, W. A. **Principles of Wood Science and Technology**. I Solid Wood. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1968. 592p.

LAUDARES, F. A. L. **EFEITOS DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO NAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS DE MADEIRAS NATIVAS E EXÓTICAS**. 2022. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

LEITE, E. R. S.; HEIN, P. R. G.; SOUZA, T. M.; RABELO, G. F. **Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis**. Revista Cerne, Lavras, v. 18, n. 1, p. 41-47, 2012.

LIMA, L. B. **Efeito de produtos de acabamento nas propriedades acústicas de madeiras da Amazônia**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

LONGUI, Eduardo Luiz et al. **Relationship among extractives, lignin and holocellulose contents with performance index of seven wood species used for bows of string instruments**. Iawa Journal, v. 33, n. 2, p. 141-149, 2012.

MANTILLA, C.; VLADIMIRO, E.; AZEVEDO, J.; PIRES, A. **Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som fundamentos físicos e resultados experimentais**. Revista Cerne, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, 2003.

MARQUES, H. B. M.; MARTINS, V. A.; SOUZA, M. R. de; ALVES, M. V. da S. **Efeito da secagem nas propriedades acústicas**. 120. ed. 2009. REMADE: Revista da Madeira. Disponível em:
<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1391&subject=Instrumentos Musicais&title=Efeito da secagem nas propriedades acusticas>. Acesso em: 11 Jan. 2023.

MARQUES, S. S.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, E. S.; SILVA, A. G.; FIEDLER, N. C. **Estudo comparativo da massa específica aparente e retratibilidade da madeira de pau-Brasil (*Caesalpinia echinata* LAM.) nativa e de reflorestamento**. Revista Árvore, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 373-380, 2012.

MATSUNAGA, M.; OBATAYA, E.; MINATO, K.; NAKATSUBO, F. **Working mechanism of adsorbed water on the vibrational properties of wood impregnated with extractives of pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng.)**. Journal of Wood Science, Tsukuba, v. 46, n. 2, p. 122-129, 2000.

MENDES, A. de S.; MARTINS, V. A.; MARQUES, M. H. B. **Programas de secagem para madeiras brasileiras**. Brasília: IBAMA, 1998. 114 p.

MORA, C. R.; SCHIMLECK, L. R.; ISIK, F.; MAHON JR., J. M.; CLARK III, A.; DANIELS, R. F. **Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees**. Canadian Journal of Forest Research, Ottawa, v. 39, n. 8, p. 1421-1429, 2009.

MOREIRA, H., M. **A importância da Amazônia na definição da posição brasileira no regime internacional de mudanças climáticas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Relações Internacionais “San Tiago Dantas”) - UNESOP, UNICAMP, PUC, SÃO PAULO, 2009.

MORESCHI, C. J. **PROPRIEDADES DA MADEIRA**. 4. ed. Curitiba, 2014. Disponível em:

<<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/PROPRIEDADES%20DA%20MADEIRA.pdf>> Acesso em: 07 Jan. 2023.

MOURA, L. F. de; BRITO, J. O. **Influência da desrama artificial sobre a densidade básica, a composição química e as características dos traqueídeos da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*** Barr. Et. Golf. Revista *Árvore*, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 369-374, 2001.

NETO, A. L.; SILVA, J. R. M. da; LIMA, J. T.; RABELO, G. F. **EFEITO DAS DIFERENTES MADEIRAS NO ISOLAMENTO ACÚSTICO**. Floresta, Curitiba, v. 38, n. 4, p. 673-682, 2008.

NOGUEIRA, M. **Classificação de peças de madeira serrada de dimensões estruturais de *Eucalyptus* sp. com uso de ensaios não-destrutivos**. 2007. Tese (Doutorado em agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2007.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Propagação de ondas acústicas na madeira. *In*: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 7., 2000, São Carlos. *Anais [...]*. São Carlos: USP, 2001.

OLIVEIRA, H. A.; VAREJÃO, C. J. M.; CRUZ, A. I. **DETERMINAÇÃO DE CONSTITUINTES QUÍMICOS E EXTRATIVOS DAS MADEIRAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS AMAZÔNICAS**. *In*: Congresso de Iniciação Científica, 2., 2013. Manaus. *Anais [...]*. Manaus, 2013.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. R. **Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira *Eucalyptus saligna* Smith**. Revista *Árvore*, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

PARHAM, R. A.; GRAY, R. L. Formation and structure of wood. **The chemistry of solid wood**. Washington DC: ROWELL, R, American Society, 1984.

PENEDO, W. R. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), 1982, 393 p.

PORTO, A. L. G. **Questões de preservação de bens culturais: a madeira como objeto de estudo**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

QUIRINO, W. F. & VALE, A. T. **Retificação térmica de *Eucalyptus grandis***. Revista Floresta, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (FUPEF), Edição Especial, p. 60-66, 2002.

REZENDE, M. A. de. **Retratibilidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Eucalyptus saligna* e suas relações com a umidade e a densidade**. Scientia Forestalis, IPEF-Instituto de Pesquisas Florestais, n. 64, p. 120-127, 2003.

REZENDE, M. A.; SAGLIETTI, J. R. C.; GUERRINI, I. A. **Estudo das interrelações entre massa específica, retratibilidade e umidade da madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* aos 8 anos de idade**. IPEF, Botucatu, n. 48/49, p. 133-141, 1995.

ROCHA, J. S.; DE PAULA, E. V. C. M.; SIQUEIRA, M. L. **Flexão estática em amostras pequenas livres de defeitos**. Acta Amazônica, Manaus, n. 18(1-2), p. 147-162, 1988.

ROEDERER, J. G. **Introdução à Física e Psicofísica da Música**. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 1998.

ROWELL, R.M.; PETTERSEN, R.; TSHABALALA, M. A.; Cell wall chemistry from: Handbook of **Wood Chemistry and Wood Composites**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2012. Disponível em: <<https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/b12487-5>> Acesso em 01 fev. 2023.

RUJINIRUN, C.; PHINYOCHEEP, P.; PRACHYABRUED, W.; LAEMSAK, N. Chemical treatment of wood for musical instruments. Part I: acoustically important properties of wood for the Ranad (Thai traditional xylophone). **Wood Science and Technology**, v. 39, n. 1, p. 77-85, 2005.

SANDBERG, D.; KUNAR, A.; MANTANIS, G. Wood modification technologies - a review. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 10, p. 895-908, 01 dez. 2017.

SANTANA, M. A. E.; OKINO, E. Y. A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. **Holzforschung**, v. 61, n. 5, p. 469-477, 2007.

SEGUNDINHO, P. G. de A.; CARREIRA, M. R.; REGAZZI, A. J.; DIAS, A. A. **Influência do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade de vigas de *Pinus sp.*** Ambiente Construído, v. 17, n. 3, p. 319-329, 2017.

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I.; BONDUÉLI, G. M.; REZENDE, M. A. de. **Efeito da vaporização na umidade de equilíbrio e sua implicação nas propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid.** Revista Floresta, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (FUPEF), v. 31, n. 1 e 2, p. 114-118, 2001.

SLOOTEN, H. J. van der; SOUZA, M. R. de. **Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para manufatura de instrumentos musicais.** Manaus, 1993, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/5432>. Acesso em: 20 dez. 2022.

SOARES, M. A. **PRODUÇÃO DE UM VIOLÃO CLÁSSICO EM MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis*).** 2014. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/142904/000867439.pdf?sequence=1>.> Acesso em: 20 Dez 2022.

SOUZA, M. R. de. **Classificação de madeiras para instrumentos musicais.** Brasília: IBDF/DEL/ LPF, 1983, 21p.

SPROßMANN, R.; ZAUER, M.; WAGENFÜHR, A. Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars. **Results in physics**, v. 7, p. 1737-1742, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316873645_Characterization_of_acoustic_and_mechanical_properties_of_common_tropical_woods_used_in_classical_guitars.> Acesso em: 21 Dez 2022.

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science.** New York: Ronald Press, 1964. 549p.

TELES, R. F. **Avaliação de madeiras amazônicas para utilização em instrumentos musicais.** IBAMA/ LPF, Brasília, p. 32, 2005.

TELES, R. F.; SOUZA, M. R. D.; WIMMER, P. **Acoustical Properties of 10 Amazonian Hardwoods.** Hiroshima: Editora Científica Digital, 2018, 294-302p.

TSOUMIS, G. **Wood as Raw Material.** London: Pergamon Press, 1968.

VALE, A. T. do; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. **RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE CINCO ESPÉCIES DE CERRADO.** Ciência Florestal, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.

VALENTE, B. M. R. T.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; LUCIA, R. M. D. **Variabilidade radial e longitudinal das propriedades físicas e anatômicas da madeira de angico-vermelho.** Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 485-496, 2013.

WASTOWSKI, A., D. **Química da Madeira.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2018.

WEGST, U. G. K. Wood for sound. **American Journal of Botany**, v. 93, n. 10, p. 1439-1448, 2006. Disponível em: <https://bsapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.3732/ajb.93.10.1439>.> Acesso em 08 Jan 2023.

WOOD, A. **The Physics of Music.** 6. ed. Davies Press, 2013.

YANO, H.; KAJITA, H.; MINATO, K. Chemical treatment of wood for musical instruments. **The journal of the acoustical society of America**, v. 96, n. 6, p. 3380-3391, 1994.

ZATLOUKAL, P., SUCHOMELOVÁ, P., DÖMÉNY, J., DOSKOCIL, T., MANZO, G.,
TIPPNER, J. Possibilities of Decreasing Hygroscopicity of Resonance Wood Used in Piano
Soundboards Using Thermal Treatment. **Applied Sciences**, v. 11, n. 475, 2021.
ZIMMERMANN, M. H. **Xylem structure and ascent of sap**. Berlin: Spring Verlag Berlin
and Heidelberg GmbH, 1983.