

**ANÁLISE DO SOM TRANSMITIDO POR  
MADEIRAS DE DIFERENTES DENSIDADES**

**ANÇANO LOSCHI NETO**

**2007**

**ANÇANO LOSCHI NETO**

**ANÁLISE DO SOM TRANSMITIDO POR  
MADEIRAS DE DIFERENTES DENSIDADES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

**Orientador:**

**Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva**

**LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2007**

**ANÇANO LOSCHI NETO**

**ANÁLISE DO SOM TRANSMITIDO POR  
MADEIRAS DE DIFERENTES DENSIDADES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

Aprovada em 1º de agosto de 2007

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes      UFLA

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo      UFLA

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva  
UFLA  
(orientador)

**LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2007**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Loschi Neto, Ançano.

Análise do som transmitido por madeiras de diferentes densidades /  
Ançano Loschi Neto. -- Lavras : UFLA, 2007.  
47 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2007.

Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Madeira. 2. Isolamento acústico. 3. Análise espectral. I. Universidade  
Federal de Lavras. II. Título.

CDD - 674

## SUMÁRIO

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Características de som.....	3
2.2 Aspectos fisiológicos da audição .....	7
2.3 Acústica de ambientes .....	11
2.3.1 Isolamento sonoro .....	11
2.3.2 Tratamento interno de ambientes .....	13
2.3.3 Acústica no ambiente de trabalho .....	15
2.4 Propriedades fundamentais da madeira .....	16
2.4.1 Densidade.....	16
2.4.2 Umidade.....	17
2.5 Propriedades acústicas da madeira .....	17
2.6 Avaliação das propriedades da madeira utilizando princípios acústicos.....	19
2.7 Tipos de sinais utilizados em ensaios acústicos.....	19
2.8 Análise espectral .....	20
2.9 Grandezas acústicas.....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	22
3.1 Seleção das espécies e caracterização das propriedades fundamentais.....	22
3.1.1 Madeira de <i>Eucalyptus</i> .....	22
3.1.2 Madeiras de <i>Pinus</i> e <i>Dipteryx</i> .....	23
3.2 Confeção das barreiras sonoras.....	23
3.3 Coleta dos dados e análise espectral.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1 Densidade e umidade .....	30
4.2 Velocidade de propagação de ondas de tensão .....	31
4.3 Isolamento sonoro e análise espectral .....	32
5 CONCLUSÕES .....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
ANEXOS .....	41

*Aos que lutam e, mesmo não sendo reconhecidos, tem consciência de sua vitória. Aos que fazem do caminho uma forma de fazer justiça. Aos que nunca deixam uma pessoa sair de sua presença sem estar melhor ou mais feliz. Aos que acreditam que a recompensa não vem apenas no final, mas sim durante a caminhada.*

## **OFEREÇO**

*À minha família, por ser a base da minha vida. Meu filho e esposa,*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Meus pais Maria e Aristeu, meus irmãos Rudolpho e Cláudio, minha irmã Priscila e meu sobrinho Philipe pelo amor, apoio e compreensão nos momentos difíceis. Sintam-se igualmente vitoriosos.

À minha esposa Fernanda e meu filho Antônio, pelos momentos em família.

À D. Lídia, Sr. Paulo e Giovanni pelo apoio.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Florestais pela oportunidade.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor José Reinaldo Moreira da Silva pela orientação, amizade e ensinamentos que certamente serão aplicados no decorrer da vida.

Aos demais professores do DCF/UFLA, especialmente àqueles do setor de Ciência e Tecnologia da Madeira.

Ao Professor Giovanni Francisco Rabelo pela participação da banca examinadora.

Ao professor João Cândido Fernandes pelas respostas às dúvidas.

Às amigas de Pós-graduação Marina, Claudinéia, Polliana e Adriana.

Aos funcionários Carlos, Vico, Zé Fazenda, Gilson, Hernani, Chica, Rose, Claret.

Aos amigos e colegas Clair, Pedro, Marcelo, Gabriel, Carlão, Edy, Marisa, Meire, Luana, Sérgio, Betão, José Benedito, Rafael, Alexandre, Thiago, Alan e a todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos da época da graduação, sempre presentes nos momentos importantes.

À todos que estiveram presentes em minha vida, muito obrigado!!!

## RESUMO

LOSCHI NETO, Ançano. **Análise do som transmitido por madeiras de diferentes densidades.** 2007. 47p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG<sup>1</sup>

A percepção do ambiente está ligada aos órgãos do sentido, principalmente visão e audição. Qualquer perturbação nessa percepção acarreta desconforto e até prejuízo à saúde do homem. Por isso, um ambiente fechado deve ser projetado visando também conforto acústico, o que quase nunca ocorre. Quando o problema se torna limitante, são necessárias correções que podem tornar-se onerosas. A madeira se apresenta como uma boa alternativa para tratamento acústico por apresentar características isolantes e absorvedoras. O isolamento acústico depende das características do material, principalmente dimensões, forma e densidade. O objetivo deste trabalho foi avaliar o isolamento sonoro proporcionado por madeiras de diferentes densidades e verificar o comportamento do isolamento por meio da análise espectral. Foram selecionadas madeiras do gênero *Dipteryx* (Cumarú), *Eucalyptus* e *Pinus* com cinco grupos de densidades distintas. Com as tábuas de espessura de 1,7 cm foram montadas barreiras acústicas em forma de cubos de 60 cm de arestas internas. A avaliação do isolamento e análise espectral foi feita num campo amplo e gramado. O experimento consistiu em emitir uma onda, gerada pelo computador, por meio de um alto-falante localizado dentro da barreira acústica e captá-la por meio de um microfone situado a um metro de distância. O nível de pressão sonora gerado foi medido com um decibelímetro a cada 10 segundos, perpendicular à propagação do som. Os dados foram analisados estatisticamente pelo teste SNK e a análise espectral do ruído foi feita pelo programa SpectraPlus<sup>®</sup>. O melhor isolamento acústico foi apresentado pela madeira de *E. grandis* (0,880 g/cm<sup>3</sup>), com uma atenuação de 25,7 dB(A). Já o pior desempenho foi apresentado pela madeira de *Pinus* sp., com 15 dB(A). Essas madeiras apresentaram a maior e menor densidade, respectivamente, confirmando assim a Lei da Massa. Com relação à análise espectral, pode-se afirmar que as maiores diferenças se encontram em frequências abaixo de 200 Hz. Dentre as espécies analisadas, o *Dipteryx* sp. e *E. grandis* (0,880 g/cm<sup>3</sup>) foram as que apresentaram maior isolamento nessa faixa. A partir de 200 Hz, todas as curvas apresentaram um desempenho semelhante.

Palavras-chave: Madeira, isolamento acústico, análise espectral

---

<sup>1</sup> Comitê Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva – (Orientador); José Tarcísio Lima – (co-Orientador).

## ABSTRACT

LOSCHI NETO, Ançano. **Analysis of sound transmitted by woods of different densities.** 2007. 47p. Dissertation (Master in Wood Science and Technology) – Federal University of Lavras, Lavras, MG<sup>2</sup>

The human perception of the environment is linked to the organs of senses, mainly to sight and hearing. Any disturb in that perception brings about discomfort and even man's health damages. Therefore, a closed place should be designed aiming also at acoustic comfort, which seldom occurs. When the problem becomes limiting, corrections are needed, which can become onerous. Wood presents itself as a good alternative for presenting isolating and absorbing characteristics. Acoustic isolation depends upon the characteristics of the material, mainly on dimensions, shape and density. The objective of this work was evaluating the sound isolation provide by woods of different densities and verifying the behavior of the isolation through the spectral analysis. Woods of the genera *Eucalyptus*, *Pinus* and *Dipteryx* (Cumaru) with five groups of distinct densities were selected. From boards of 1,7 cm in thickness, boxes of 60 cm of internal edges were mounted. An equipment for evaluating of the isolation and spectral analysis was mounted in a wide and grassy field. The experiment consisted in emitting a form of wave, generated in a computer by means of a loudspeaker situated inside the wooden box and picked it up through a microphone with a decibelmeter and its values recorded every 10 seconds. At every 30 readings, the loudspeaker was turned 90o inside the box and the measurement was performed on the side perpendicular to the propagation of sound. The data were analyzed statistically by the SNK test and spectral analysis of the noise made by the SpectraPlus® program. The wood which promoted the best sound isolation was *E. grandis* (0,880g/cm<sup>3</sup>) with an attenuation of 25.7 dB (A). But the wood with the worst performance was *Pinus* sp. with 15 dB(A). Exactly the ones which showed the highest and poorest density, respectively, confirming, thus, the Mass Law. As regards spectral analysis, one can state that the highest differences lie at frequencies bellow 200Hz. Among the species analyzed, *Dipteryx* sp. and *E. grandis* (0,880g/cm<sup>3</sup>) were the ones which showed an increased isolation in that range. From 200 Hz, all the curves presented a similar performance.

Key words: Wood, acoustic isolation, spectral analysis.

---

<sup>2</sup> Guidance Committee: José Reinaldo Moreira da Silva – (adviser); José Tarcísio Lima – (co-adviser)

## 1 INTRODUÇÃO

O homem, ao receber informações do ambiente e assimilá-las, pode reagir de maneira favorável ou não ao estímulo. Uma das grandes causas da queda na qualidade de percepção do ambiente é a poluição. Ela possui diversas formas de manifestação. Nesse contexto, encaixam-se as poluições atmosféricas, visual, o lixo e também a poluição sonora.

A perda de audição induzida por ruído (PAIR) tem como causa a exposição a elevados níveis de pressão sonora, acima de 85 dB(A), por um determinado tempo. Quanto mais elevado o nível de pressão sonora, menor o tempo permitido de exposição, considerando que o indivíduo encontra-se sem equipamento de proteção individual. Essa situação quase sempre acontece de forma inconsciente, visto que as pessoas se “acostumam” ao ruído, não percebendo o quanto se prejudicam quando expostas ao barulho.

Em ambientes escolares, por exemplo, a queda no rendimento de alunos expostos a níveis de ruído elevados é considerada preocupante, por alguns especialistas. Os professores, no intuito de tentar compensar tal inconveniente, têm, muitas vezes, que aumentar o volume da voz, forçando as cordas vocais. Esse fato, muito comum em escolas brasileiras, prejudica muito a formação dos alunos e a saúde dos professores.

Para um ambiente ser considerado ideal para a permanência de pessoas, do ponto de vista acústico, ele deve se adequar certas premissas, as quais são tratadas pela acústica arquitetônica. O grande foco é dado em dois sentidos: o controle de sons no interior dos ambientes e o isolamento contra ruídos externos.

As características sonoras estabelecidas no interior de um espaço fechado são condicionadas tanto pela concepção arquitetônica como pelos revestimentos, pelo mobiliário, pelo equipamento e tudo mais que compõe seu interior.

Assim, a madeira, material de excelência nos revestimentos, assume papel determinante no desempenho acústico desses locais, podendo ser utilizada para promover a absorção sonora ou as reflexões difusas, condicionando, dessa forma, o campo sonoro estabelecido no interior dos mesmos.

Materiais usados para isolamento apresentam alta densidade, dificultando a passagem da onda sonora. Para tratamento interno de ambientes, utilizam-se materiais mais porosos, que favorecem a absorção da energia sonora, como é o caso da madeira.

Porém, o isolamento não ocorre igualmente dentro da faixa de frequências audíveis pelo ser humano. Dessa forma, a análise espectral do ruído em um ambiente possibilita verificar quais frequências são dominantes e necessitam ser isoladas.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o isolamento sonoro proporcionado por madeiras com diferentes densidades e verificar o comportamento desse isolamento por meio da análise espectral.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Características de som

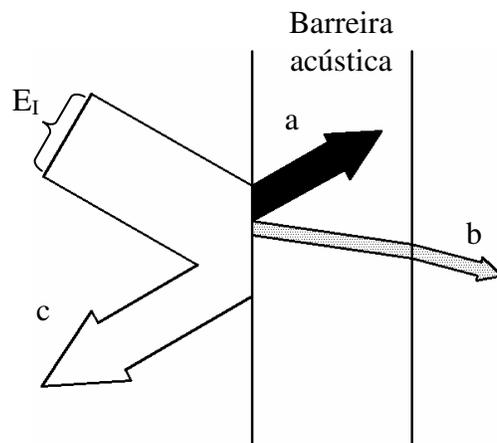
O som é definido como um fenômeno acústico. Ele consiste na propagação de ondas sonoras produzidas por um corpo que vibra. A vibração causa variações na pressão ou na densidade do meio ao seu redor e sensibiliza o ouvido (Okuno et al., 1986). A propagação ocorre em meios que, quando deformados, conseguem retornar ao estado inicial logo que a causa deformadora é interrompida. Esse fato caracteriza um meio elástico (Fernandes, 2002).

O som é toda e qualquer vibração ou onda mecânica que se propaga em um meio dotado de forças internas (elástico, viscoso, etc.), capaz de produzir no homem uma sensação auditiva (ABNT-NBR 12.179, 1992).

A caracterização da onda sonora baseia-se em três parâmetros, os quais são atribuídos independentemente: altura, intensidade e timbre, caracterizados a seguir:

- 1) altura do som refere-se à frequência. Ela classifica o som como grave, médio e agudo. Por exemplo: o som de um trombone é considerado grave, enquanto o de um violino é agudo. A voz humana se localiza numa faixa de frequência média;
- 2) intensidade do som é o fluxo de energia que passa por unidade de área. A intensidade depende da fonte sonora e da distância desta para onde a intensidade é medida. Corresponde ao volume do som. Por exemplo: o som de uma televisão é mais forte quanto mais perto dela o ouvinte se posiciona;
- 3) timbre é a característica que permite distinguir a fonte emissora do som, quando este é emitido na mesma altura e intensidade por duas fontes distintas.

Ao encontrar uma superfície, a onda sonora sofre alterações (Figura 1). Essas transformações estão relacionadas ao tipo de material constituinte da superfície. Elas podem ser definidas como: absorção, que ocorre especialmente nas superfícies mais macias e porosas (Figura 1-a); transmissão, que ocorre quando a onda sonora transmite-se através da superfície de um lado para outro do material, por meio da ressonância (Figura 1-b); reflexão, que ocorre quando a onda sonora incide na superfície e muda a direção devido à convexidade ou concavidade da superfície ou, ainda, quando a onda apresenta um determinado ângulo de incidência (Figura 1-c).



Adaptado de Fernandes (2002)

FIGURA 1 Alterações sofridas por uma onda sonora ao entrar em contato com uma barreira acústica. Em que:  $E_I$  - energia incidente; a) energia absorvida; b) energia transmitida e c) energia refletida.

A quantidade de energia sonora absorvida, transmitida e refletida varia em função do material do anteparo, bem como da frequência da onda incidente (Fernandes, 2002).

O ouvido humano apresenta restrições na percepção do som. Elas compõem os chamados limiares de audibilidade. Considerando a frequência de um som, o homem percebe sons situados numa faixa que vai de 20 a 20.000 Hz. Com relação à intensidade e à percepção do som, segue a Lei de Weber-Fechner, segundo a qual, “o aumento do estímulo necessário para produzir um incremento mínimo de sensação é proporcional ao estímulo preexistente” (Fernandes, 2002). Essa lei que é aplicada a qualquer estímulo físico que acomete o ser humano e seus valores depende justamente das grandezas envolvidas no estímulo (Equação 1).

$$S = k \cdot \log\left(\frac{E}{E_0}\right) \quad (1)$$

Em que:

S = resposta ao estímulo físico

k = constante

E = estímulo

$E_0$  = valor mínimo do estímulo, abaixo do qual não há sensação, também chamado estímulo de referência.

Um som puro, com frequência de 1.000 Hz, apresenta um limiar de audibilidade ( $I_0$ ) de, aproximadamente,  $10^{-16}$  W/cm<sup>2</sup>, ou seja, esta é a mínima intensidade para se ouvir esse som. O limiar da dor correspondente para essa frequência é  $10^{-2}$  W/cm<sup>2</sup> (Clímaco, 2003).

A intensidade do som é estudada por uma escala de referência chamada decibel (dB). Segundo Bistafa (2006), essa medida foi criada em 1929, como submúltiplo do bel, o qual foi desenvolvido para ser uma unidade para medição da perda de potência em cabos telefônicos. Porém, observou-se que 1 dB era exatamente a mínima variação de potência sonora detectável pelo sistema

auditivo humano. Dessa forma, pode-se afirmar que o decibel corresponde a dez vezes o logaritmo da razão entre a intensidade do som medido e a intensidade do limiar auditivo para uma mesma freqüência.

Segundo Clímaco (2003), o nível sonoro de intensidade (NSI), em decibels, é descrito por Weber-Fechner (Equação 2).

$$NIS = 10 \cdot \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (2)$$

em que:

NIS = nível de intensidade sonora;

10 = constante;

I = estímulo sonoro, em  $W/m^2$ ;

$I_0$  = valor mínimo do estímulo,  $10^{-12} W/m^2$ .

Comparando-se as Equações 1 e 2 conclui-se que a resposta ao estímulo físico (S) corresponde ao NIS e o valor constante (k) é 10. O estímulo (E) de um fenômeno sonoro, como neste caso, corresponde à intensidade (I) tendo como unidade  $W/m^2$ . Já o estímulo de referência ( $E_0$ ) corresponde ao limiar de audibilidade para a freqüência de 1000 Hz, cujo valor é de  $10^{-12} W/m^2$ . Como resultados obtém-se o nível de intensidade sonora em decibel.

Por se tratar de uma escala logarítmica, a operação de adição de decibels tem certas particularidades. Basicamente, a cada aumento de 3 dB(A) tem o dobro de energia sonora anterior. Uma maneira simplificada para executar adições é apresentada na Tabela 1. Primeiramente deve-se encontrar a diferença entre os dois níveis e, em função desse valor, adiciona-se, ao maior nível, o valor correspondente (Clímaco, 2003).

TABELA 1 Valores de adição ao maior nível para a obtenção do nível total, em função da diferença entre dois valores de intensidade sonora, em dB(A)

Diferença entre os níveis dB(A)	Acréscimo ao maior nível dB(A)
0	3
1	2,5
2	2,1
3	1,8
4	1,4
5	1,2
6	1,0
7	0,8
8	0,6
9	0,5
10	0,4
12	0,2

Fonte: Adaptado de Clímaco (2003)

Bistafa (2006) recomenda, ao somar três ou mais níveis sonoros, utilizar os valores dois a dois, dando preferência àqueles mais próximos ou iguais. Além disso, também é recomendável arredondar o valor final para o número inteiro mais próximo, tendo em vista a incapacidade de o sistema auditivo perceber variações da ordem de frações de decibels.

## 2.2 Aspectos fisiológicos da audição

A percepção do espectro do som ocorre em nossos ouvidos devido a um processo fisiológico determinado pelas suas características. O nosso aparelho auditivo funciona como um transformador de variações de pressão em estímulos nervosos, que são levados ao cérebro por meio dos nervos (Bistafa, 2006).

Na Figura 2 encontra-se um esquema representativo da anatomia do ouvido. O ouvido externo é composto pelo pavilhão e o canal auditivo. Sua função é captar as vibrações sonoras e levá-las ao tímpano. No ouvido médio, os três ossículos, martelo, bigorna e estribo, amplificam essas vibrações em cerca

de 15 vezes. Finalmente, no ouvido interno essas vibrações são transformadas em impulsos eletroquímicos no interior da cóclea.

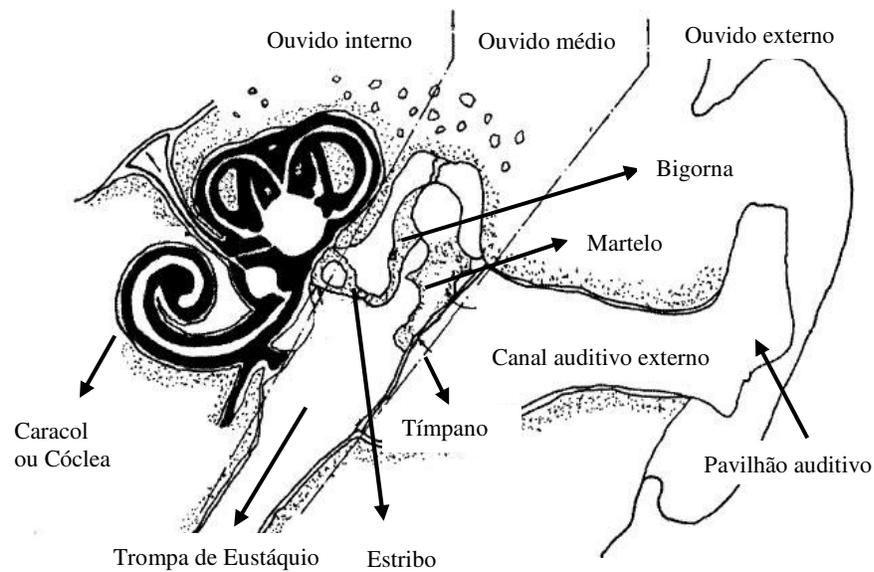


FIGURA 2 Ilustração do ouvido humano.

Fonte: Clímaco (2003)

Ainda na cóclea existe a chamada membrana basilar. Esta membrana possui fibras nervosas que se sensibilizam de forma diferente, dependendo da intensidade e frequência do som. Tal fato nos faz perceber de forma diferente dois sons de igual intensidade, mas de frequências diferentes e vice-versa (Clímaco, 2003).

O ouvido humano apresenta restrições quanto à percepção subjetiva da intensidade do som. Dependendo da frequência, um som pode ser percebido de forma diferente, mesmo tendo o mesmo nível de pressão sonora. Para medir essa grandeza foi criado o nível de audibilidade (Bistafa, 2006). Na Figura 3 encontra-se a curva de audibilidade para o limiar de audição, tendo como

referência o valor de zero decibel para a frequência de 1000 Hz. Cada ponto na curva apresenta a mesma audibilidade. Nota-se que, para causar a mesma sensação de intensidade que um tom puro de 1000 Hz, um tom puro de 100 Hz necessitaria de 23 dB a mais. Já um tom de 20 Hz necessitaria ser 71 dB mais intenso (Calixto & Rodrigues, 2004).

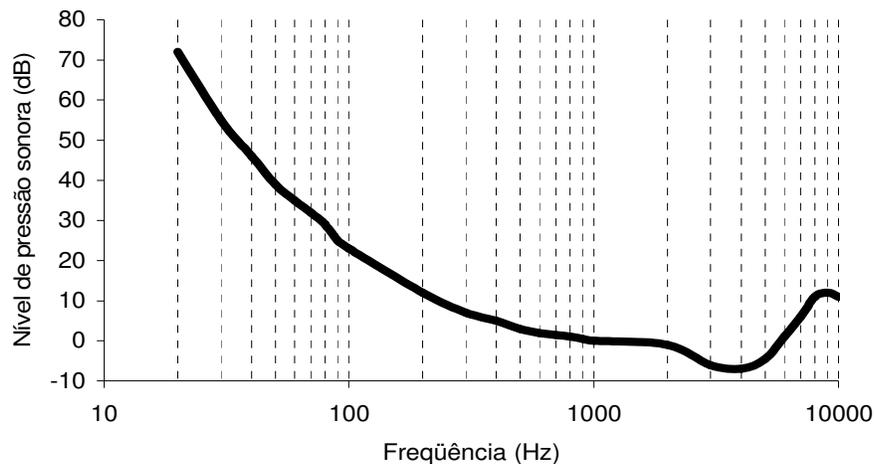


FIGURA 3 Curva do nível de audibilidade para o limiar de audição

Fonte: Adaptado de Calixto & Rodrigues (2004)

Ruído é qualquer som indesejável. Sua definição se baseia na condição do ouvinte, seu estado de saúde, humor, cultura, etc. O ruído afeta o homem de várias formas, causando prejuízos ao funcionamento do sistema auditivo e comprometendo a atividade física, fisiológica e mental do indivíduo a ele exposto (Clímaco, 2003).

A poluição sonora é um “inimigo” sutil. Muitas vezes, o som é considerado pelas pessoas como uma onda passageira e inevitável. Não se percebe que, na maioria das vezes, o ruído interfere de forma drástica na comunicação e na concentração (Pimetel-Souza, 2000). Uma inteligibilidade de cem por cento para palavras fáceis requer uma fala com intensidade de, pelo

menos, 10 dB(A) acima do ruído de fundo no ambiente. Em nossas cidades tal intensidade é de aproximadamente 70 dB(A). Nesse nível, as cordas vocais podem ficar estressadas, dependendo do tempo de fala. Isso acarreta também uma incompatibilização das boas condições de concentração para atividades mentais e psicológicas de quem conversa (Seep et al., 2002).

Oiticica & Gomes (2004) constataram que, devido à formação de ambientes insalubres em salas de aulas, os professores passam por estágios que variam desde um estresse leve até estresse degenerativo. Foi observado também um desgaste das cordas vocais dos professores por conta de alto índice de ruído nas salas de aula.

A partir de 35 dB(A), o ruído provoca reações vegetativas. A longo prazo e em níveis acima de 70 dB(A), pode causar hipertensão arterial, secreção elevada de hormônios corticosteróides, estresse, infarto, etc. (Pimentel-Souza, 2000).

O ruído, quando presente de forma não controlada e acima de 55 dB(A), estimula o sistema nervoso simpático. Quando esse sistema é constantemente excitado, o organismo reage de forma a se defender do ambiente. Em se tratando de ruído, não se materializa a figura do agressor, desenvolvendo-se medo e ansiedade (Bistafa, 2006).

Segundo Pimentel-Souza (2000), a impotência de agir diante de uma ofensiva causada por um agressor não materializado, como no caso de um ruído, pode ocasionar acúmulo de conflitos internos. Os sintomas que aparecem são: mal-humor, agressões mútuas e violência. Aumentando-se o nível de ruído branco<sup>1</sup> de 55 a 85 dB(A), faz-se elevar a frequência cardíaca e a taxa de secreção de adrenalina, além de ocorrerem perdas de desempenho em tarefas de cálculos e restrições no campo visual.

---

<sup>1</sup> Ruído caracterizado por apresentar a mesma densidade de energia sonora ao longo do espectro de frequências (Fernandes, 2002).

### **2.3 Acústica de ambientes**

Segundo Fernandes (2002), um dos maiores desafios enfrentados por arquitetos e engenheiros civis é a acústica de ambientes, também chamada acústica arquitetônica. Esse fato ocorre em razão da rara literatura em língua portuguesa e do pouco enfoque dado em publicações estrangeiras.

Para ser considerado ideal para a permanência de pessoas, um ambiente deve apresentar certos níveis de conforto. Acusticamente, o ambiente deve proporcionar às pessoas um entendimento correto da fala e níveis de ruído aceitáveis, sendo esses determinados pela NBR 10.151 (ABNT, 2000).

Os principais pontos tratados nessa área são: o isolamento contra o ruído e o controle do som no interior do ambiente.

#### **2.3.1 Isolamento sonoro**

O isolamento sonoro consiste em impedir ou, pelo menos, reduzir a propagação de sons entre dois ambientes distintos.

Para se conseguir um isolamento adequado é necessário o uso de materiais que apresentam densidades mais elevadas (Paya, 1994). O isolamento de sons aéreos é regido pela lei da massa ou da densidade. Cada vez que a massa de uma superfície é dobrada, ocorre um incremento de 4 a 5 dB na sua capacidade atenuadora (Silva, 2005).

De acordo com Bistafa (2006), qualquer problema de ruído envolve uma fonte sonora, sua trajetória de transmissão e o agente receptor. As fontes de ruídos abrangem toda e qualquer atividade que gere sons indesejáveis, como máquinas, tráfego, instalações industriais, atividades domésticas, etc. A trajetória de transmissão inclui o ar e as estruturas sólidas contidas no ambiente. O receptor é, geralmente, o ser humano. O controle do ruído obedece a uma hierarquia. Primeiramente, deve-se tentar eliminar ou reduzir o ruído a partir de sua origem, utilizando-se os equipamentos de proteção coletiva (EPC). No

entanto a situação mais comum é o controle do ruído na trajetória de transmissão com o uso de barreiras, silenciadores e outros métodos. O controle do ruído junto ao receptor é possível com o uso de equipamentos de proteção individual (EPI).

Segundo Laranja & Tamagna (2002), a transmissão sonora através de paredes tornou-se um grande problema de estudo devido aos seguintes fatores:

- a) aumento do número de fontes geradoras de ruídos;
- b) os materiais modernos são mais leves, fato que desfavorece o isolamento sonoro;
- c) maior conhecimento sobre os efeitos do nível excessivo de ruído sobre a saúde do homem.

De acordo com Bistafa (2006), como a maneira mais comum de atuação no controle de ruídos é na sua transmissão, as seguintes medidas podem ser empregadas:

- a) aumentar a distância entre a fonte e o receptor;
- b) utilizar barreiras ou biombos para o enclausuramento de máquinas;
- c) utilizar silenciadores;
- d) realizar tratamento das superfícies com material absorventes;

O uso de painéis leves, quando colocados formando um espaço entre eles e a parede, fornece um aumento na atenuação do som, principalmente nas baixas frequências (Silva, 2005). Considerando essa característica de o isolamento não ser o mesmo em todas as frequências, torna-se necessária a medição da intensidade do ruído em faixas de frequência de 1/3 de oitava, abrangendo, principalmente, o intervalo entre as frequências de 64 e 4.000 Hz.

O valor da atenuação sonora proporcionada por alguns materiais usados em construção encontra-se na Tabela 2. Nesse caso, foi feita uma média dos valores em cada banda de oitava, obtendo-se, assim, um valor único representativo do total isolado pelo material (Fernandes, 2002).

TABELA 2 Atenuação da transmissão do som algumas superfícies, em dB

Material	Perda de transmissão em dB(A)
Parede de tijolo maciço com 45 cm de espessura	55
Parede de 1 tijolo de espessura de 23 cm	50
Parede de meio tijolo de 12 cm e rebocada	45
Parede de concreto de 8 cm de espessura	40
Parede de tijolo vazado de 6 cm e rebocada	35
Porta de madeira maciça dupla com 5 cm por folha	45
Janela de vidros duplos de 3 mm separados 20 cm	45
Janela com placas de vidro de 6 mm de espessura	30
Porta de madeira maciça de 5 cm de espessura	30
Janela simples com placas de vidro de 3 mm	20
Porta comum sem vedação no batente	15
Laje de concreto rebocada com 18 cm de espessura	50

Fonte: Fernandes (2002)

### 2.3.2 Tratamento interno de ambientes

Ao contrário do que ocorre ao ar livre, a onda sonora dentro de um ambiente sofre interferência das ondas refletidas pelas superfícies que demarcam o recinto (Bistafa, 2006). O tratamento interno consiste em distribuir o som de forma homogênea pelo ambiente, livre de qualquer interferência ou efeito que cause desconforto (Oiticica & Gomes, 2004). O principal parâmetro relacionado à caracterização interna do ambiente é o tempo de reverberação (RT60), definido como o tempo gasto para a energia sonora decair 60 dB (A), contando a partir de sua interrupção. Está relacionado com o volume físico e com os materiais constituintes das superfícies dos objetos presentes no ambiente e também as paredes, teto e piso (Clímaco, 2003).

O cálculo do tempo de reverberação (RT60) pode ser feito utilizando-se a Equação 3, que foi desenvolvida por Wallace Clement Sabine. Ela é denominada “Equação de Sabine”, em homenagem a seu autor.

$$RT(60) = \frac{0,161V}{\sum S\alpha} \quad (3)$$

em que:

$RT(60)$  é o tempo de reverberação, em segundos;

$V$  é o volume do ambiente, em  $m^3$ ;

$S$  é a área de cada superfície de diferentes materiais, em  $m^2$ ;

$\alpha$  é o coeficiente de absorção de cada superfície.

Assim como para o nível de ruído, o tempo de reverberação ideal varia de acordo com o uso proposto para o ambiente. Na Tabela 3 estão relacionados alguns tempos de reverberação ( $RT60$ ) considerados ideais para ambientes escolares.

TABELA 3 Tempos de reverberação adequados, para alguns ambientes.

Ambientes	Intervalo de tempo ideal de reverberação (segundos)
Ensaíais musicais	0,6–1,2
Auditórios	1,0–1,5
Ginásios	1,2-1,6
Lanchonetes	0,8–1,2
Salas de aula	0,4–0,6

Fonte: Adaptado de Seep et al, (2002)

Segundo Clímaco (2003), o tempo de reverberação ainda pode ser calculado, empiricamente, em função do volume do ambiente (Equação 4). Nesse caso, obtém-se o valor ótimo para um determinado ambiente.

$$RT(60) = r \left[ \left( 0,012 * \sqrt[3]{V} \right) + 0,1070 \right] \quad (4)$$

em que:

$RT(60)$  é o tempo de reverberação ótimo, segundos;

$V$  é o volume do ambiente, em  $m^3$ ; e

$r$  é a variável que depende do uso final do ambiente<sup>2</sup>.

Materiais utilizados na correção acústica interna de ambientes são fibrosos ou porosos. A absorção da energia sonora ocorre pelo atrito das moléculas de ar no interior do material na passagem da onda sonora. O coeficiente de absorção de cada material obedece à mesma relação encontrada no isolamento sonoro, em que ocorre uma variação do valor para cada frequência.

### 2.3.3 Acústica no ambiente de trabalho

O ambiente de trabalho requer condições ideais para o melhor rendimento dos profissionais envolvidos. Além disso, condições adversas podem causar danos à saúde dos trabalhadores.

Segundo Bistafa (2006), a perda de audição induzida por ruído (PAIR) ocorre pela associação de dois fatores: nível de ruído e do tempo de exposição a ele. Segundo a Norma Regulamentadora nº 15, a exposição a níveis de ruído igual ou acima de 85 dB(A) já requer do trabalhador atitudes defensivas. Para esse valor, o tempo de exposição máxima permitida é de 8 horas. Acima desse período, o ambiente já é considerado insalubre.

Quanto maior o nível de ruído, menor será o tempo máximo de exposição permitido. A cada aumento de 5 dB(A) ocorre uma redução do tempo

---

<sup>2</sup> A variável  $r$  assume o valor igual a 4 se o ambiente for utilizado para uso de palavra falada; 5, no caso de ambientes para orquestras e 6, no caso de corais.

pela metade até 115 dB(A), em que o tempo de exposição é de 7 minutos. Acima desse nível não é permitida a exposição sem a devida proteção, sob o risco de dano grave à audição.

## **2.4 Propriedades fundamentais da madeira**

As propriedades fundamentais da madeira são descritas como aquelas relacionadas à sua formação. São elas que irão determinar a durabilidade, a identificação, a resistência e também a qualidade dos produtos gerados a partir de uma árvore. São agrupadas em propriedades anatômicas, físicas, mecânicas e químicas.

Dentre as propriedades físicas da madeira, as mais estudadas são: a umidade e as densidades básica e aparente.

### **2.4.1 Densidade**

Segundo Stewart & Polak (1975), a densidade aparente da madeira, definida como a relação entre a massa e volume a uma determinada condição de umidade, é uma das mais representativas propriedades físicas da madeira. A densidade básica também é uma característica considerada como das mais importantes, tendo como principais pontos a facilidade na determinação e sua relação com as demais propriedades da madeira. É definida como a relação entre a massa absolutamente seca e o volume em máxima expansão da madeira.

De acordo com Foelkel, citado por Rosado (1982), a densidade básica depende da parte da madeira analisada, do tipo de célula predominante, do diâmetro da fibra, da espessura da parede e do volume de materiais não estruturais, como extrativos e tiloses.

Segundo Carrasco & Azevedo Júnior (2003), a velocidade de propagação da onda ultra-sônica é afetada pela densidade da madeira. Um

aumento deste valor, com umidade constante ao longo da amostra, provoca um aumento na velocidade de propagação. Esse fato se deve à deposição de celulose na face interna da parede celular, causando um aumento significativo da rigidez. Assim, a esperada atenuação causada pelo aumento da densidade é compensada por este parâmetro.

#### **2.4.2 Umidade**

A umidade está diretamente relacionada aos processos de trabalhabilidade e utilização da madeira.

Segundo Brown et al. (1952), a água ocorre na madeira na forma livre, adsorvida e de constituição. A água livre ocupa os espaços vazios e pode ser eliminada da madeira com maior facilidade. A água adsorvida preenche as paredes das células e por isso se gasta mais energia para retirá-la. A água de constituição está presente na madeira como parte integrante de sua constituição química, sendo sua remoção somente possível com transformações na estrutura química da madeira.

De acordo com Skaar (1972), os fatores que mais influenciam na umidade de equilíbrio da madeira são a umidade relativa, a temperatura, a espécie da madeira e de extrativos, a história da exposição, tensões mecânicas e a radiação. No entanto, a umidade relativa e a temperatura são os fatores que predominam nessa influência.

#### **2.5 Propriedades acústicas da madeira**

De acordo com Araújo (2002), as propriedades acústicas da madeira, relacionadas aos princípios de ressonância e as propriedades de radiação do som,

foram aplicadas por muito tempo, apesar de não serem cientificamente comprovadas.

Segundo Bucur, citado por Shimoyama (2005), a avaliação das propriedades acústicas da madeira pode indicar a anisotropia desse material, considerando sua relação com as características anatômicas.

Para a confecção de instrumentos musicais, os valores de resistência à propagação da onda sonora e de resistência à irradiação sonora devem ser cuidadosamente estudados (Souza, 1983). Esses valores estão intimamente ligados ao módulo de elasticidade dinâmico da madeira e servem de embasamento para uma série de experimentos relacionados à determinação de propriedades da madeira por meio de métodos acústicos, tais como ultra-som e propagação de ondas de tensão.

Algumas madeiras amazônicas apresentam ótimo potencial para a confecção de instrumentos musicais. Segundo Teles (2004), as madeiras mais indicadas para a confecção de violões variam de acordo com a parte do instrumento. Para o tampo, o marupá, o freijó verdadeiro e o amapá são algumas das espécies mais apropriadas. Para a escala do instrumento, recomendam-se madeiras mais escuras e com densidade elevada como o cumaru, a envira-preta e a gombeira, além do já consagrado jacarandá.

Fagundes (2003) estudou madeiras amazônicas para confecção do corpo da gaita diatônica. As espécies mais indicadas foram o louro, o ipê e o açoita-cavalo.

Segundo Fernandes (2004), a fabricação de guitarras pode ser uma alternativa rentável para utilização de madeiras comuns da Amazônia. Além disso, as guitarras podem apresentar características superiores com relação àquelas confeccionadas com madeiras tradicionais.

## **2.6 Avaliação das propriedades da madeira utilizando princípios acústicos**

Os métodos acústicos estão relacionados à propagação da onda sonora pelo material. Normalmente, são de natureza não-destrutiva e fornecem informações sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Segundo Targa et al. (2005), os métodos não-destrutivos mais utilizados são o de vibração transversal, a propagação de ondas de tensão e a propagação de ondas de ultra-som.

Puccini (2002), estudando madeira de *Pinus*, concluiu que o método de ultra-som pode ser utilizado para a detecção da presença de nós e desvio de grã.

Targa et al. (2005), estudando madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora*, constataram diferença de 12% em relação ao módulo de elasticidade dinâmico obtido com o método de vibração transversal e aquele obtido com ensaios convencionais destrutivos de flexão.

Em seus estudos também com *Pinus*, Shimoyama (2005) conclui que a técnica de aplicação de ondas de tensão pode ser utilizada para a determinação das propriedades da madeira, devido à alta correlação entre suas variáveis tempo e velocidade de propagação das ondas e as propriedades avaliadas. No mesmo estudo são ressaltadas as vantagens do método, como o baixo custo e a facilidade de operação.

Cruz (2006) concluiu que a umidade da madeira de *Eucalyptus* pode ser estimada aplicando-se a técnica de propagação de ondas de tensão e que esta sofre influência direta da densidade básica.

## **2.7 Tipos de sinais utilizados em ensaios acústicos**

A maioria dos ensaios acústicos requer a utilização de ruídos padronizados, os quais apresentam características peculiares (Fernandes, 2002). Os mais utilizados são o ruído branco e o ruído rosa. A principal diferença entre esses dois tipos de ruído está relacionada à densidade de energia sonora presente

ao longo do espectro de frequência. Enquanto o ruído branco apresenta uma quantidade de energia constante para todas as frequências, o ruído rosa apresenta uma queda de 3 dB por oitava (Fernandes, 2002).

Passando-se esses ruídos por filtros com largura de banda de porcentagem constante, o ruído branco apresenta um acréscimo de 3 dB por oitava. Isso ocorre porque, ao dobrar a frequência, a largura da banda também dobra, resultando numa maior quantidade de energia sonora por oitava. Já no ruído rosa, a análise do som por meio de bandas de porcentagem constante fornece uma resposta plana. Isso torna o ruído rosa muito útil em medições de sistemas acústicos (Bistafa, 2006).

## **2.8 Análise espectral**

Segundo Fernandes (2002), a análise espectral é o estudo das frequências que compõem um som complexo. O espectro de um som se refere à relação entre amplitude e frequência de um som complexo. O francês Jean Baptiste Fourier (1768–1830) foi o primeiro a aplicar esse método de análise, que hoje é conhecido como Análise de Fourier, e que demonstra que qualquer forma de onda pode ser decomposta em uma soma de ondas senoidais. A frequência dessas ondas senoidais que formam o espectro guarda uma relação numérica com a frequência mais baixa da série, a qual é chamada de frequência fundamental ( $f_0$ ).

## **2.9 Grandezas acústicas**

Dentre as grandezas acústicas, as mais importantes são: intensidade, potência e pressão sonora. A intensidade sonora é definida como a quantidade de energia sonora que atravessa uma unidade de área, durante certo tempo. Potência sonora é uma característica intrínseca da fonte sonora. Seu valor independe do meio e sua unidade é Watts.

Segundo Bistafa (2006), pressão sonora é a grandeza mais importante para caracterizar os efeitos do ruído em seres humanos. Sua unidade é o pascal (Pa). A pressão sonora pode ser obtida de maneira simples por meio de aparelhos como o decibelímetro, o qual converte seus valores para a escala de decibels, facilitando sua interpretação. Seus valores dependem da distância do ponto em que é medida e da fonte sonora, além da quantidade de energia sonora absorvida pelo meio.

Na medição do nível de pressão sonora com o decibelímetro é natural que ocorram variações nos valores obtidos durante um intervalo de tempo. Isso ocorre pelo fato de o aparelho fornecer o valor instantâneo da pressão sonora. Em função disso, torna-se necessário obter um valor médio que represente a quantidade de energia sonora ponderada em função do tempo de ocorrência dos valores individuais. Esse valor é denominado nível equivalente ( $L_{eq}$ ). Segundo Bistafa (2006), sua utilização é recomendada por diversas normas e legislações relacionadas à medição de ruído, principalmente relativas ao tempo de exposição de pessoas a ruídos contínuos ou flutuantes. A obtenção desse valor consiste em realizar leituras de níveis sonoros em intervalos iguais e aplicar a Equação 5.

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_i} \right) \quad 5$$

em que:

$L_{eq}$  = nível de ruído equivalente, em dB(A)

$n$  = número de medições válidas

$f_i$  = frequência do ruído  $L_i$

$L_i$  = nível de ruído medido a cada 10 segundos, em dB(A)

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento para a obtenção da análise espectral do isolamento sonoro em diferentes madeiras foi conduzido em três etapas. Na primeira, foram definidas as madeiras utilizadas, priorizando-se a variação na densidade entre elas. Na segunda etapa foi realizada a confecção das barreiras acústicas. Na terceira fase foram obtidos os perfis acústicos para cada espécie. Essas fases serão tratadas separadamente.

#### 3.1 Seleção das espécies e caracterização das propriedades fundamentais

A seleção das madeiras que foram usadas no trabalho baseou-se na diferença de densidade. Primeiramente foi feito um levantamento bibliográfico sobre algumas espécies e suas respectivas densidades e, depois, foram selecionadas as espécies que atenderiam ao propósito do trabalho. As madeiras selecionadas foram do gênero *Eucalyptus*, *Pinus* e *Dipteryx* (Cumaru). Para o gênero *Eucalyptus* foram utilizados três clones de densidades distintas, totalizando então cinco grupos.

A determinação da densidade aparente e da umidade foi feita no Laboratório de Tecnologia da Madeira do DCF/UFLA, conforme as normas NBR 11941 (2003) e NBR 7190 (1997), da ABNT, respectivamente. A densidade aparente foi obtida pela relação entre a massa e volume, ambos na umidade de equilíbrio.

##### 3.1.1 Madeira de *Eucalyptus*

O material selecionado foi proveniente das árvores de *Eucalyptus grandis* que pertencem ao teste de procedências da rede do Prodepef, implantado em dezembro de 1975, no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras/MG.

Foram selecionadas toras de diferentes árvores com densidade básica variando dentro dos valores pré-estabelecidos. As toras foram encaminhadas à Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira. Dessas toras foram retiradas tábuas com 2,5 cm de espessura, 3,0 m de comprimento e largura variável, dependendo do diâmetro de cada árvore.

As tábuas passaram por um processo de secagem, primeiramente ao ar livre e posteriormente em estufa, até atingir 14% de umidade. Após a secagem, foram retirados corpos-de-prova para a determinação da densidade aparente e da umidade de cada tábua. O restante foi cortado com 74 cm de comprimento e empilhado no pátio coberto do Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF/UFLA).

### **3.1.2 Madeiras de *Pinus* e *Dipteryx***

Tanto a madeira de *Pinus* sp. quanto a de *Dipteryx* sp. (cumaru) foram adquiridas em uma madeireira local da cidade de Lavras. Para cada uma das madeiras, as tábuas foram selecionadas da seguinte forma:

- 6 tábuas de 400 x 30 x 2,5 cm (comprimento x largura x espessura)
- 3 tábuas de 400 x 15 x 2,5 cm (comprimento x largura x espessura)

As tábuas foram serradas, ficando com comprimento final em 74 cm. Durante esse processo foi retirado material para a determinação da umidade e da densidade aparente. Em seguida, foram empilhadas para secagem ao ar livre, num galpão coberto.

### **3.2 Confeção das barreiras acústica**

No Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF/UFLA), as tábuas foram separadas e armazenadas por espécie e densidade. Para a confecção das barreiras

acústicas, foram separadas 18 tábuas por espécie. Procurou-se escolher tábuas livres de nós e sem desvio de grã, selecionadas a partir de análise visual.

O primeiro procedimento foi o preparo das tábuas para a montagem dos lados da barreira acústica. Após o aplainamento, as tábuas ficaram com espessura final de 1,7 cm. Posteriormente, foram armazenadas na câmara climática, aguardando estabilização. Foi medida a velocidade de propagação das ondas de tensão longitudinalmente à grã da madeira, utilizando-se, para isso, o equipamento Stress wave timer (Figura 4). Para tanto, foram marcados três pontos eqüidistantes ao longo da largura das tábuas. Foram realizadas três repetições em cada ponto.

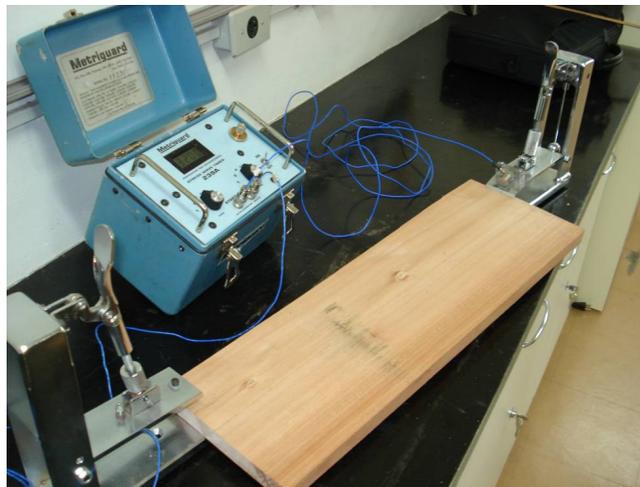


FIGURA 4 Temporizador de ondas de tensão usado para determinar a velocidade de propagação das ondas na madeira

Em seguida, as tábuas foram transportadas para o Laboratório de Usinagem da Madeira, onde foram executados os encaixes tipo macho-fêmea (Figura 5), para evitar perda de energia sonora entre as tábuas.

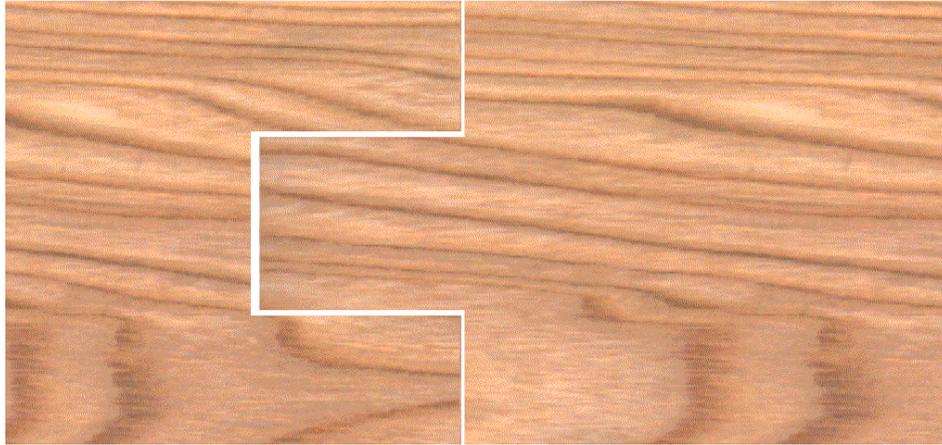


FIGURA 5 Encaixe entre tábuas, tipo macho-fêmea

Assim, foram confeccionados os painéis laterais, fundo e tampa das barreiras acústicas. Após a colagem das tábuas, os painéis foram montados, formando um cubo com 60 cm de arestas internas. A tampa constituiu-se de uma parte móvel, sendo presa por 4 parafusos em cada lado da caixa.

### **3.3 Coleta dos dados e análise espectral**

O equipamento básico para a avaliação do isolamento consistiu em um microcomputador com processador de 2.4 GHz com 512Mb de memória RAM; um amplificador/receiver; um alto falante com 50 W RMS e resposta de frequência de 22 Hz a 30.000 Hz; um microfone de cápsula dinâmica com resposta de frequência de 40 Hz a 18.000 Hz e um decibelímetro que atende às recomendações da IEC 651, além das barreiras acústicas confeccionadas para a avaliação. Na saída de áudio do microcomputador foi acoplado o amplificador. O microfone foi também conectado no microcomputador, na entrada da placa de som. O alto-falante foi ligado ao amplificador/receiver, de modo que qualquer som emitido pelo computador seria transferido a ele. Para o suporte do alto-falante adaptou-se um pedestal para microfone.

O experimento foi conduzido em terreno gramado e plano, localizado no campus da UFLA. Segundo Herrera et al. (2002), a escolha desse tipo de terreno tem a preocupação de se evitar a reflexão dos sons que incidem no piso para o microfone, em condição *quasi-não-reverberante*.

Por meio do aplicativo Sound Forge® foi gerado um arquivo de áudio contendo um ruído aleatório. Primeiramente, esse ruído foi emitido pelo alto-falante, captado pelo microfone, distantes 100 cm entre si e a 100 cm de altura do piso, sem nenhum anteparo entre esses (Figura 6).



FIGURA 6 Montagem do equipamento para a caracterização da fonte sonora

A pressão sonora foi medida com o decibelímetro, que também se encontrava a 100 cm de distância do alto-falante. Foram realizadas 90 leituras para o cálculo do nível de pressão sonora equivalente ( $L_{eq}$ ).

O ruído foi captado pelo microfone durante 5 segundos. Com a análise espectral desse ruído, conseguiu-se a caracterização da fonte sonora. As condições climáticas se encontravam satisfatórias para a realização do teste, sem

vento ou precipitação. Após a caracterização da fonte sonora, o alto-falante foi colocado dentro das barreiras acústicas e, mantendo-se constante a intensidade do som, repetiu-se todo o procedimento. Foram feitas 30 leituras para cada um dos lados da barreira acústica, exceto a tampa (Figura 7), totalizando 90 leituras.



FIGURA 7 Montagem utilizada para realização do ensaio com a barreira acústica de madeira ainda sem a tampa.

Os procedimentos foram feitos para as barreiras acústicas com as diferentes madeiras.

Para garantir o isolamento do som foi utilizado um pequeno bloco de isopor, fechando-se o espaço entre o pedestal e o fundo de madeira (Figura 8).



FIGURA 8 Pedestal para microfone adaptado para apoiar o alto-falante.

Também com as barreiras acústicas, o centro do alto-falante e o do microfone foram posicionados a uma altura de 100 cm do piso e também distantes 100 cm (Figura 9).

Com o decibelímetro, mediu-se o ruído de fundo, seguindo-se as recomendações da Norma Técnica L11.031 (1986) da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB).

Os dados coletados pelo decibelímetro foram transcritos para uma planilha de dados e analisados estatisticamente pelo aplicativo computacional Sisvar, utilizando-se o Teste de Student-Newman-Kuels (SNK), a 5% de significância.

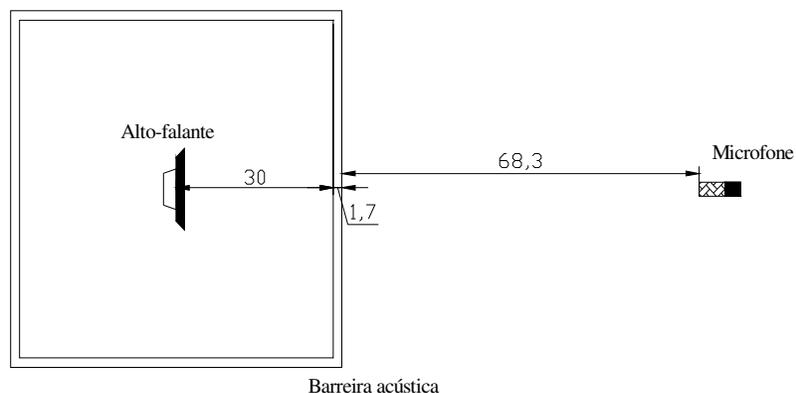


FIGURA 9 Desenho esquemático, em visão superior, da distribuição dos equipamentos, dimensões em cm.

O ruído capturado pelo microfone foi armazenado no formato *wave*, Mono, 16 bits, 44.100 Hz e, depois de editado, foi analisado pelo aplicativo SpectraPuls®, que fornece o espectro sonoro por meio da transformada rápida de Fourier (FFT). A resposta para cada madeira foi obtida com a subtração da resposta de frequência obtida na caracterização da fonte sonora. Todas as caracterizações foram feitas em bandas de um terço de oitava padrão, variando de 20 a 10.000 Hz.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Densidade e umidade

As densidades das madeiras selecionadas para a confecção das barreiras acústicas são apresentadas na Tabela 4. A densidade básica desejada refere-se àquela procurada em literatura, que serviu de base para a escolha das espécies do experimento. A densidade básica selecionada para *Eucalyptus* foi obtida com a escolha de toras que apresentaram valores variando dentro dos padrões pré-determinados.

TABELA 4 Valores médios de umidades, densidades aparentes e densidades básicas desejadas e selecionadas por espécies.

Espécie	Umidade %	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	
			Desejada	Selecionadas*
<i>E. grandis</i> - 1	14	0,728	0,800	0,596
<i>E. grandis</i> - 2	14	0,799	0,900	0,612
<i>E. grandis</i> - 3	15	0,880	1,000	0,609
<i>Dipteryx</i> sp. (cumarú)	14	0,817	1,090**	
<i>Pinus</i> sp.	14	0,445	0,530**	

\* representa os valores médios das árvores amostradas; \*\* dados de literatura

Todas as madeiras apresentaram valores de umidade próximo do equilíbrio para a região de Lavras/MG, de aproximadamente 15%. Assim, pode-se considerar que essa variável não comprometeu a avaliação do isolamento acústico.

A densidade aparente obtida apresenta boa distribuição, possibilitando uma avaliação satisfatória, com as cinco classes de densidade bem definidas. Os dados referentes à densidade e à umidade para as madeiras encontram-se no Anexo A.

#### 4.2 Velocidade de propagação de ondas de tensão

Os dados referentes à velocidade de propagação das ondas de tensão encontram-se no Anexo B. Observa-se, com relação aos dados obtidos, uma pequena variação entre as velocidades de propagação nos diferentes pontos da mesma tábua. Para a madeira de *E. grandis* ( $0,880 \text{ g/cm}^3$ ) o maior e menor valores da velocidade de propagação das ondas de tensão foram de 4242 e 4217 m/s, respectivamente. Na Tabela 5 encontra-se a análise de variância para a velocidade de propagação das ondas de tensão. Verifica-se que houve diferença significativa entre as velocidades para as diferentes madeiras, o que já era esperado, devido à variação da densidade existente.

TABELA 5 Análise de variância para a velocidade de propagação de ondas de tensão

FV	GL	QM	Fc
Espécie	4	415853,94	248,205*
Erro	10	1675,44	
Total	14		

A comparação múltipla das médias da velocidade de propagação está apresentada na Tabela 6. Para as madeiras de *Eucalyptus grandis*, observa-se que há um incremento na velocidade de propagação com o aumento da densidade. Segundo Carrasco & Azevedo Júnior (2003), isso ocorre pelo fato de o aumento da densidade acontecer devido a um aumento da deposição de celulose na parede celular. O resultado é um acréscimo nos valores de rigidez do material, com conseqüente aumento da velocidade de propagação das ondas de tensão.

TABELA 6 Comparação múltipla das médias da velocidade de propagação de ondas de tensão, em m/s, em função da espécie.

Tratamento	Médias
<i>E. grandis</i> (0,728 g/cm <sup>3</sup> )	3182,40 a
<i>Pinus</i> sp.	3630,25 b
<i>E. grandis</i> (0,799 g/cm <sup>3</sup> )	3683,84 b c
<i>Dipteryx</i> sp. (cumaru)	3753,19 c
<i>E. grandis</i> (0,880 g/cm <sup>3</sup> )	4227,93 d

Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste de Tukey.

### 4.3 Isolamento sonoro e análise espectral

Os resultados da avaliação do nível de pressão sonora obtidos para cada situação encontram-se no Anexo C. Considerando-se a mesma madeira, os dados apresentaram pouca variação. A madeira de *Pinus* sp. apresentou valores de 67,1 a 69,2 dB(A). Já para a madeira de *Dipteryx* sp. os valores variaram de 64,9 a 65,2 dB(A).

Na Tabela 7, encontra-se o resumo da análise de variância dos níveis de pressão sonora. Observa-se que houve diferença significativa entre o nível de pressão sonora para os tratamentos utilizados na avaliação, a 5% de significância.

TABELA 7 Análise de variância para o nível de pressão sonora.

FV	GL	QM	Fc
Tratamento	6	13053,50	15380,123*
Erro	623	0,848726	
Total	629		

Os valores mínimos, médios e máximos de pressão sonora são apresentados na Figura 10. Observa-se uma relação sinal/ruído entre o sinal do alto-falante emitido sem a barreira acústica e o ruído de fundo, da ordem de

41 dB(A). Isso proporciona boa faixa para avaliação na variação de ruídos intermediários, uma vez que evita que o som do alto-falante seja mascarado por ruídos de fundo. Observa-se uma pequena variação entre os valores máximos e mínimos em cada espécie. Porém, apesar de numericamente muito próximos, esses valores apresentam diferença significativa, do ponto de vista acústico. De acordo com a escala utilizada, a cada 3 decibels tem-se o dobro de energia sonora e 1 decibel é a mínima variação perceptível pelo sistema auditivo humano.

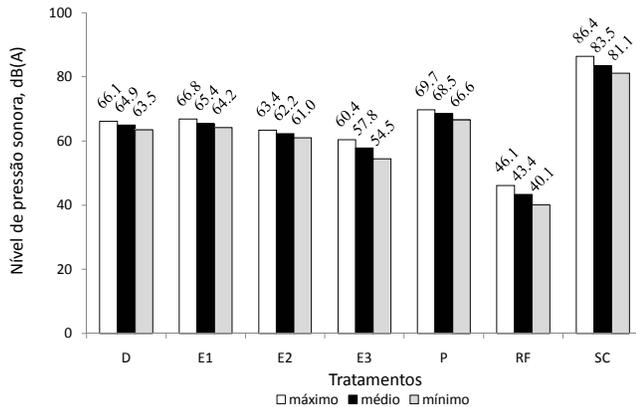


FIGURA 10 Valores máximos, médios e mínimos de pressão sonora obtidos nos diferentes tratamentos. Em que: D – *Dipteryx* sp. (0,817 g/cm<sup>3</sup>); E1– *E. grandis* (0,728 g/cm<sup>3</sup>); E2– *E. grandis* (0,799 g/cm<sup>3</sup>); E3– *E. grandis* (0,880 g/cm<sup>3</sup>); P– *Pinus* sp. (0,445 g/cm<sup>3</sup>); RF– Ruído de fundo e SC– Sem barreira acústica.

Na Tabela 8 encontra-se a comparação múltipla das médias do nível de pressão sonora. Pode-se afirmar que, estatisticamente, todas as madeiras apresentaram níveis de pressão sonora diferentes. A madeira que apresentou menor isolamento foi o *Pinus* sp., justamente a que apresentou também a menor

densidade. Este fato é devido a um maior nível de pressão sonora apresentado por esta madeira. De modo geral, essa situação foi predominante, ou seja, quanto menor a densidade da espécie, menor também o isolamento proporcionado, confirmando a Lei da Massa (Silva, 2005).

TABELA 8 Comparação múltipla das médias do nível de pressão sonora, em dB(A), para as diferentes madeiras, ruído de fundo e ruído sem barreira acústica.

Tratamento	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Médias
Sem barreira acústica		83,5 a
<i>Pinus</i> sp.	0,445	68,5 b
<i>E. grandis</i> - 1	0,728	65,4 c
<i>Dipteryx</i> sp. (cumaru)	0,817	64,9 d
<i>E. grandis</i> - 2	0,799	62,2 e
<i>E. grandis</i> - 3	0,880	57,8 f
Ruído de fundo		43,4 g

Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste SNK.

A Figura 11 apresenta a análise espectral do ruído gerado pelo computador. Ao ser emitido pelo alto-falante e capturado pelo microfone, o ruído apresentou uma distorção. Esse fato se deve às restrições apresentadas pela faixa de resposta de frequência no equipamento. Essa distorção corresponde à caracterização da fonte sonora utilizada.

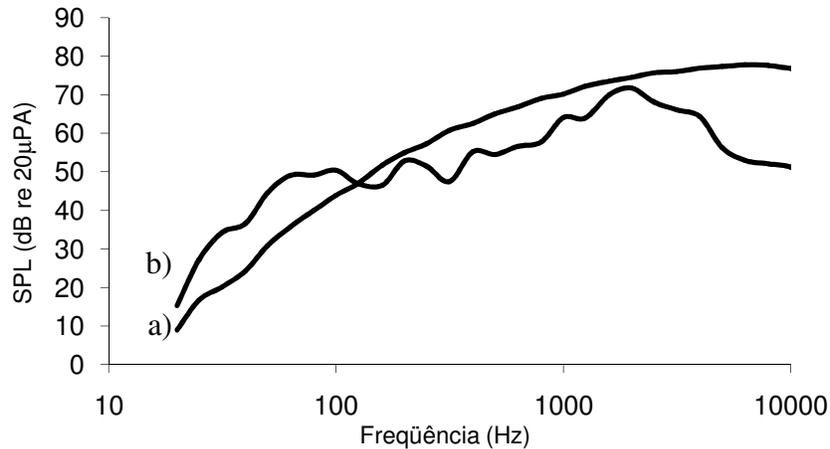


FIGURA 11 Análise espectral do ruído utilizado no experimento, em que: a) ruído gerado pelo programa no computador e b) distorção apresentada pelo ruído ao ser emitido pelo alto-falante e capturado pelo microfone, durante a caracterização da fonte sonora.

Na Figura 12 encontram-se as curvas referentes à análise espectral do ruído ao atravessar as barreiras acústicas das diferentes madeiras utilizadas. Observa-se um comportamento praticamente igual em todas as madeiras para frequências médias e altas, ou seja, acima de 200 Hz.

Para baixas frequências houve um comportamento bem característico para as madeiras. A madeira de *Dipteryx* sp. apresentou um comportamento inicial com maior atenuação. No entanto, a partir de 50 Hz, a maior atenuação foi apresentada pelo *E. grandis* (0,880 g/cm<sup>3</sup>). As madeiras de *E. grandis* (0,728 g/cm<sup>3</sup>) e *E. grandis* (0,799g/cm<sup>3</sup>) apresentaram um comportamento inicial semelhante entre si, com uma atenuação menor que a madeira de *Pinus* sp. até a frequência de 200 Hz, quando essa situação é invertida.

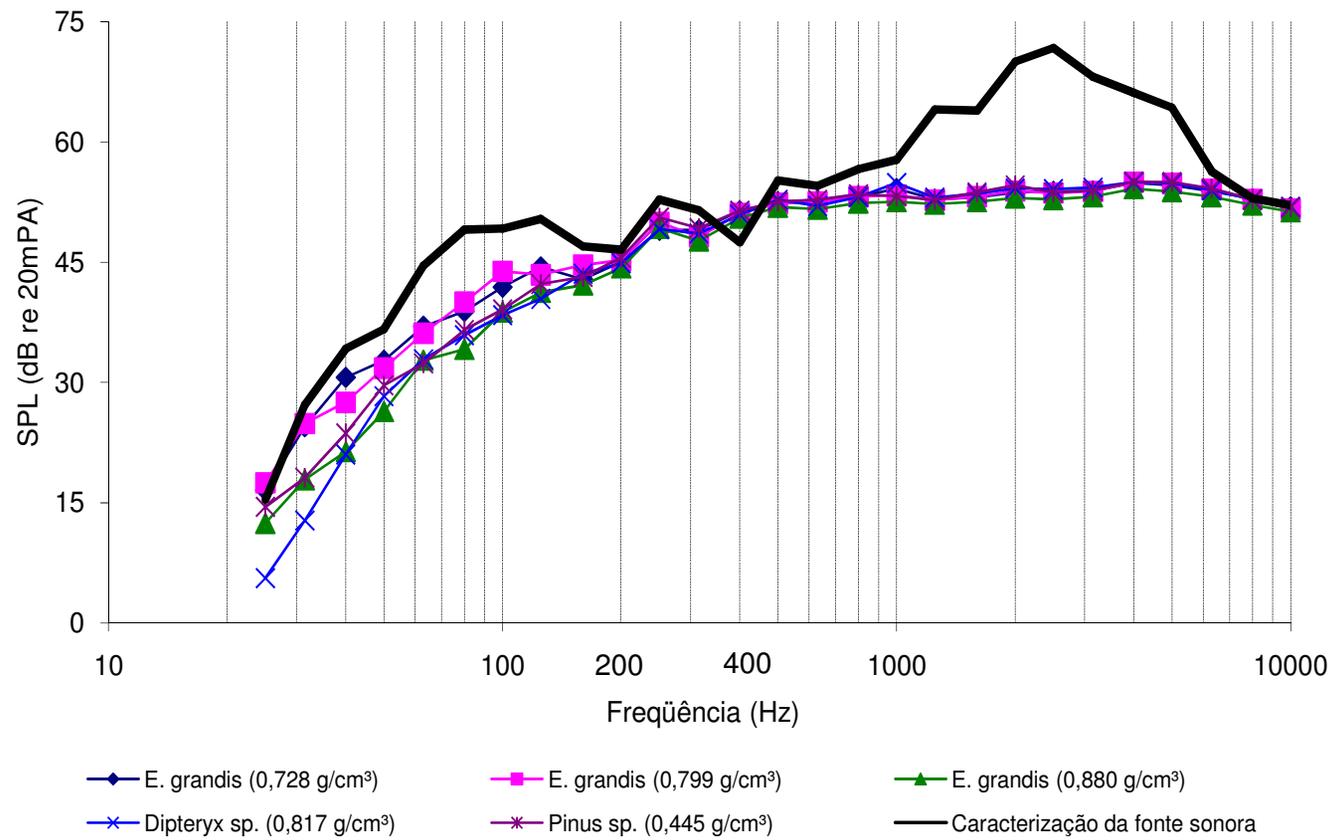


FIGURA 12 Resposta em freqüência para todas as madeiras e para a caracterização da fonte (ruído emitido sem barreira acústica).

## 5 CONCLUSÕES

- ✓ A caracterização da fonte sonora apresentou uma distorção quanto ao ruído aleatório gerado pelo computador.
- ✓ Ocorreu uma redução do nível de pressão sonora ao se utilizarem as barreiras acústicas com madeiras de diferentes densidades como anteparos.
- ✓ O tratamento que apresentou maior isolamento foi o *E. grandis* (0,880 g/cm<sup>3</sup>), com uma redução de 25,7 dB(A). O menor isolamento foi apresentado pelo *Pinus* sp., com uma atenuação de 15 dB(A).
- ✓ Houve uma queda no isolamento ao utilizar madeiras com menor densidade aparente.
- ✓ O *Dipteryx* sp.(cumaru) e o *E. grandis* (0,880 g/cm<sup>3</sup>), foram as madeiras que apresentaram maior isolamento em baixas frequência, segundo a análise espectral.
- ✓ A partir da frequência de 200 Hz houve um comportamento igual para o isolamento em todas as madeiras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, H. J. B. **Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do projeto de colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas.** 2002. 157 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma técnica NBR-12179** – Tratamento acústico em recintos fechados. 1992. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma técnica NBR-7190** – Projetos em estruturas de madeira. 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma técnica NBR-10151** – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. 2000. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma técnica NBR-11941** – Madeira – Determinação da densidade básica. 2003. 6 p.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído.** São Paulo: E. Blüncher, 2006. 368 p.

BROWN, H. P.; PANSHIN, A. J.; FORSAIT, C. C. **Textbook of wood technology.** New York: McGraw-Hill, 1952. v. 2, 783 p.

CALIXTO, W. P.; RODRIGUES, C.G. **Poluição sonora.** Goiânia: Universidade Católica de Goiás. 2004. 105 p.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais. **CERNE**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, jul./dez. 2003

CLÍMACO, R. S. C. **Conforto sonoro.** Brasília: UnB: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2003. 47 p. Notas de aula

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma Técnica L11.031** – Ruído – Determinação do nível de ruído de fundo – Método de ensaio. São Paulo, 1986.

CRUZ, C. R. **Aplicação de ondas de tensão para a estimativa da umidade em madeira de *Eucalyptus***. 2006. 72 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

FAGUNDES, P. V. **Utilização de espécies madeireiras amazônicas para fabricação do corpo da gaita diatônica**. 2003. 55 p. Trabalho Final (Conclusão de Curso em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

FERNANDES, G. A. **Avaliação de madeiras brasileiras para utilização em guitarras elétricas**. 2004. 41 p. Trabalho Final (Conclusão de Curso em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

FERNANDES, J. C. **Acústica e ruídos**. Bauru, SP: UNESP, 2002. Apostila.

HERRERA, C. G.; GUIMARÃES, G. P.; YEHIA, H. C.; MEDEIROS, E. B. Método para avaliação acústica de salas baseado em TSP. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 1., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2002.

LARANJA, R. A. C.; TAMAGNA, A. Transmissão sonora através de paredes simples. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 1., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2002

OITICICA, M. L. G. R.; GOMES, M. L. B. O estresse do professor acentuado pela precariedade das condições acústicas das salas de aula. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 14., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, ABEPRO/USFC, 2004. p. 2539-2546

OKUNO, E.; CALDAS, C.L.; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: Harbra, 1986. 490 p.

PAYA, M. **Isolamento térmico e acústico**. Barcelona: Plátano Edições Técnicas, 1994.

PIMENTEL-SOUZA, F. Efeito do ruído no homem dormindo e acordado. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19., 2000, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, SOBRAC, 2000. p. 90-108

PUCCINI, C. T. **Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP

ROSADO, S. C. da S. **Avaliação da densidade básica da madeira com diferentes idades, em *Eucalyptus spp.*** 1982. 79 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

SEEP, B.; GLOSEMEYER, R.; HULCE, E.; LINN, M.; AYTAR, P. Acústica de salas de aula. **Revista de Acústica e Vibrações**, n. 29, p. 22, jul. 2002.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

SILVA, P. **Acústica arquitetônica e condicionamento de ar.** 5.ed. Belo Horizonte: EDTAL, 2005. 339 p.

SKAAR, C. - **Water in wood.** Syracuse, Syracuse University Press. 318p. 1972.

SOUZA, M. R. **Classificação de madeiras para instrumentos musicais.** Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, 1983. (Série Técnica, 6).

STEWART, H. A.; POLAK, D. J. Relating specific gravity and mechanical properties of hardwoods to machining defects. **Forest Products Journal**, Medison, v. 35, n. 10, p. 69-72, 1975.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 291-299, maio/ago. 2005

TELES, R. F. **Avaliação de madeiras amazônicas para utilização em instrumentos musicais – Madeiras para violões.** Relatório final de projeto PIBIC. Brasília: UnB, 2004. 28 p.

## ANEXOS

### ANEXO A

TABELA 1A Densidade aparente a 14% de umidade para a madeira de *Pinus* sp.

Corpo-de-prova	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	0,444
2	0,438
3	0,468
4	0,447
5	0,470
11	0,456
12	0,469
13	0,448
14	0,452
15	0,437
16	0,495
17	0,470
18	0,444
19	0,458
20	0,422
26	0,503
27	0,465
28	0,440
29	0,459
30	0,423
Média	0,455
Desvio padrão da média	0,021

TABELA 2A Densidade aparente a 14% de umidade para a madeira de *E. grandis* (0,728 g/cm<sup>3</sup>).

Corpo-de-prova	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	0,827
2	0,689
3	0,646
4	0,746
5	0,823
11	0,827
12	0,689
13	0,646
14	0,746
15	0,823
16	0,827
17	0,689
18	0,646
19	0,746
20	0,823
26	0,827
27	0,689
28	0,646
29	0,746
30	0,823
Média	0,728
Desvio padrão da média	0,069

TABELA 3A Densidade aparente a 14% de umidade para a madeira de *E. grandis* (0,799 g/cm<sup>3</sup>).

Corpo-de-prova	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	0,866
2	0,857
3	0,885
4	0,753
5	0,697
11	0,866
12	0,857
13	0,885
14	0,753
15	0,697
16	0,866
17	0,857
18	0,885
19	0,753
20	0,697
26	0,866
27	0,857
28	0,885
29	0,753
30	0,697
Média	0,799
Desvio padrão da média	0,080

TABELA 4A Densidade aparente a 15% de umidade para a madeira de *E. grandis* (0,880 g/cm<sup>3</sup>).

Corpo-de-prova	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	0,904
2	0,896
3	0,870
4	0,856
5	0,849
11	0,904
12	0,896
13	0,870
14	0,856
15	0,849
16	0,904
17	0,896
18	0,870
19	0,856
20	0,849
26	0,904
27	0,896
28	0,870
29	0,856
30	0,849
Média	0,880
Desvio padrão da média	0,037

TABELA 5A Densidade aparente a 14% de umidade para a madeira de *Dipteryx* sp.

Corpo-de-prova	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	0,768
2	0,816
3	0,922
4	0,852
5	0,795
11	0,768
12	0,816
13	0,922
14	0,852
15	0,795
16	0,768
17	0,816
18	0,922
19	0,852
20	0,795
26	0,768
27	0,816
28	0,922
29	0,852
30	0,795
Média	0,817
Desvio padrão da média	0,101

## ANEXO B

TABELA 1B Velocidade de propagação de ondas de tensão, em m/s, para as madeiras utilizadas

Madeira	Velocidade			Média
	I	II	III	
<i>Pinus</i>	3594,91	3607,14	3688,69	3630,25
<i>Dipteryx</i> (cumaru)	3775,40	3755,31	3728,87	3753,19
<i>E. grandis</i> (0,728 g/cm <sup>3</sup> )	3238,53	3128,51	3180,18	3182,40
<i>E. grandis</i> (0,799 g/cm <sup>3</sup> )	3735,45	3651,72	3664,36	3683,84
<i>E. grandis</i> (0,880 g/cm <sup>3</sup> )	4225,10	4216,70	4242,00	4227,93

## ANEXO C

TABELA 1C Valores de pressão sonora, em dB(A), nas diferentes posições, para as madeiras utilizadas, ruído de fundo e ruído sem barreira acústica.

Tratamento	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Posição	Média, dB(A)
<i>Dipteryx</i> sp.	0,817	I	64,9
		II	64,6
		III	65,2
<i>Pinus</i> sp.	0,445	I	67,1
		II	68,7
		III	69,2
<i>E. grandis</i>	0,728	I	66,0
		II	65,5
		III	64,7
<i>E. grandis</i>	0,799	I	61,9
		II	62,3
		III	62,6
<i>E. grandis</i>	0,880	I	59,0
		II	57,8
		III	56,6
Ruído de fundo	-----	I	43,4
		II	43,3
		III	43,4
Ruído sem barreira acústica	-----	I	83,0
		II	84,0
		III	83,5