



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Leopoldo Pacheco Bastos

**Desenvolvimento e Caracterização Acústica de painéis multicamadas
unifibra, multifibras e mesclados, fabricados a partir de fibras vegetais**

Belém
2009

Leopoldo Pacheco Bastos

**Desenvolvimento e Caracterização Acústica de painéis multicamadas
unifibra, multifibras e mesclados, fabricados a partir de fibras vegetais**

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Mecânica, Instituto de
Tecnologia, Universidade Federal do Pará.
Área de Concentração em Vibrações e
Acústica.**

**Orientador: Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira
de Melo**

Belém

2009

Leopoldo Pacheco Bastos

Desenvolvimento e Caracterização Acústica de Painéis Multicamadas Unifibra, Multifibras e Mesclados, Fabricados a partir de Fibras Vegetais

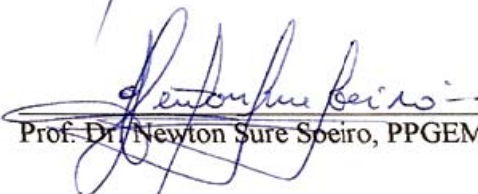
Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal do Pará. Área de concentração em Vibrações e Acústica.

Data de aprovação: 01 de dezembro de 2009.

Banca examinadora:


_____- Orientador
Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo, PPGEM/UFPA.


_____- Membro Externo
Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara Miranda, UFSC


_____- Membro Interno
Prof. Dr. Newton Sure Speiro, PPGEM/UFPA.

DEDICATÓRIA

À minha filha, Luana Beatriz,
razão da minha existência,
e à Dalliana, minha amada
companheira.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço primeiramente a Deus, o Altíssimo, por possibilitar esse momento, por iluminar o meu caminho nas horas em que mais precisei;
- Aos meus pais, Ruilimam e Juciene, e a todos os meus familiares;
- À minha filha Luana Beatriz Vaz Bastos, minha fonte de inspiração;
- Ao Grupo de Vibrações e Acústica e a todos os seus integrantes;
- Ao Professor Newton Soeiro, pelo apoio, orientação e por todo o aprendizado adquirido desde que entrei para o Grupo de Vibrações e Acústica da UFPA, em Fevereiro de 2006;
- Ao Professor Gustavo Melo pelo apoio, aprendizado e orientação, meu espelho enquanto profissional;
- Ao CNPq pela bolsa de estudo;
- Ao Anderson, do LAOS da Engenharia Química da UFPA, pela realização de ensaios que contribuíram para a conclusão deste trabalho;
- À Cintia e Fabrício, do Laboratório de Controle de Qualidade Industrial da empresa Agropalma, e a Maurício Amantea, Diretor Industrial à época, pela realização de alguns ensaios que contribuíram para a conclusão deste trabalho;
- Ao Sr. Wilson Moura, à Márcia, ao Márcio e Elias, pela contribuição, generosidade e bom tratamento que recebi durante as visitas à empresa POEMATEC.
- Ao Prof. Erasmo Felipe Vergara, à Prof^a. Dinara Paixão, e aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil, Sr. Juraci Bortoluzzi e Sr. José Luiz Guerra, pela receptividade, hospitalidade e ajuda prestada durante minha estada em Santa Maria - RS;

- À família Guerra, Sr. José Luiz Guerra, sua esposa Tânia Mara, e sua filha “Cacá” (Carolina), pela receptividade e por toda a ajuda que me prestaram enquanto estive em Santa Maria;
- Aos meus amigos Livia, Vinícius, Marco Antônio, Davi, Willi, Fernanda, Madalena, Egon e a todo o Grupo Farol, pois me acolheram como um irmão;
- À Dalliana, minha namorada, melhor amiga, minha companheira, sem você eu não conseguiria terminar este trabalho;
- E a todas as pessoas que de uma forma ou de outra ajudaram para a realização deste trabalho.

“Não é conhecer muito, mas o que é útil, que torna um homem sábio”.

Thomas Fuller, M.D.

RESUMO

Em um tempo em que altos níveis de ruído fazem parte do cotidiano das pessoas, a necessidade de controlá-los não é somente evidente, mas providencial. Atualmente a poluição sonora, em nível mundial, só não é mais grave do que a poluição do ar e da água. No Brasil a situação não é diferente, pois se estima que mais de 15 milhões de pessoas apresentem algum grau de deficiência auditiva devido a este problema ambiental. Dispositivos acústicos como painéis, barreiras, etc., quando de alta eficiência, geralmente, são de custosa aquisição, tornando, em muitas das vezes, inviável sua utilização, principalmente, por empresas de pequeno porte e orçamento limitado. Assim, soluções alternativas, a começar por novos materiais, que sejam menos custosos e possuam desempenho satisfatório surgem como uma ótima opção caso propostas tradicionais sejam inviabilizadas devido ao custo. Algumas fibras vegetais, na forma de painéis, possuem características acústicas satisfatórias quando utilizadas para reduzir a reverberação em determinados ambientes fechados. Dessa forma, considerando as tendências ambientais globais, o uso de fibras vegetais é uma boa oportunidade para agregar valor às referidas fibras e assim contribuir com o desenvolvimento tecnológico do país, já que estes materiais são de fácil obtenção, existem em abundância, não são tóxicos e provêm de fontes renováveis. Este trabalho apresenta a metodologia de desenvolvimento de painéis fabricados a partir de fibras vegetais (açai, coco, sisal e dendê), assim como a metodologia utilizada para sua caracterização acústica em câmara reverberante em escala reduzida, baseando-se na norma ISO 354/1999. Os dados de coeficiente de absorção dos painéis são obtidos através de um analisador de frequências utilizando-se o Método da Interrupção do Ruído. A comparação entre os resultados obtidos para os painéis artesanais e os materiais convencionais ensaiados permite concluir que o desempenho acústico demonstrado por alguns painéis de fibras vegetais são muito satisfatórios, uma vez que seus coeficientes de absorção sonora foram compatíveis, e em alguns casos superiores, àqueles apresentados pelos materiais convencionais em determinada faixa de frequência. Finalmente, uma comparação numérico-experimental é realizada, a fim de avaliar a influência de painéis de fibras de sisal sobre as características acústicas de uma pequena sala.

Palavras-Chave: Poluição Sonora, Soluções Alternativas, Painéis de Fibras Vegetais, Desempenho Acústico.

ABSTRACT

In a time when high noise levels are part of people's daily lives, the search for noise control is not only evident, but providential. Currently, noise pollution, to a worldwide level, is not more serious than air and water pollution only. In Brazil, the situation is not different because it is estimated that more than 15 million people have some kind of hearing loss degree due to this environmental problem. Acoustic devices such as panels, barriers, etc., when of high efficiency, generally, are of difficult acquisition due to high costs, turning, in many cases, their use impracticable, mainly for limited budget small-sized companies. Thus, alternative solutions, starting with new acoustic materials that are less costly and have satisfactory performance, emerge as a great option. Considering the global environmental trends, the use of vegetable fibers is a great opportunity to aggregate value, and technological development for agricultural producing countries, like Brazil. Beyond that, such fibers are easy to get, exist in abundance, are non toxic and derive from renewable sources. This work will present the methodology of development of panels made from vegetable fibers (açai, coconut, sisal and palm) and binding agent based on acrylate and water, as well as the methodology used to characterize them acoustically on a scale model reverberant chamber, based on ISO 354/1999. These panels are made of pressed layers of fibers interspersed with layers of binding agent. The fibers are extracted, washed, dried, and treated when necessary, while the binding agent is obtained commercially. The panels sound absorption data are obtained through a four channel frequency analyzer using the noise interruption method. Comparison of results between alternative and conventional material based panels allows to the conclusion that the acoustical performance shown by some newly developed panels are very satisfactory, since their sound absorption coefficients were compatible, and in some cases, higher to those presented by conventional materials in a given frequency range. Finally, a numerical-experimental comparison is performed in order to evaluate the influence of sisal absorbing panels over the acoustics characteristics of a small classroom.

Keywords: Noise pollution, Alternative Solutions, Panels from Vegetable Fibers, Acoustic Performance.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	20
1.1 INTRODUÇÃO.....	20
1.2 JUSTIFICATIVA.....	21
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo Geral.....	23
1.3.2 Objetivos Específicos.....	23
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	24
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 FIBRAS NATURAIS.....	25
2.1.1 Fibra de coco.....	28
2.1.2 Fibra de dendê.....	29
2.1.3 Fibra de sisal.....	30
2.1.4 Fibra de açai.....	33
2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	34
2.2.1 Resistência ao fluxo.....	38
2.2.1.1 Resistência ao fluxo específica e Resistividade ao fluxo.....	39
2.2.2 Porosidade.....	40
2.2.3 Fator estrutural e Tortuosidade.....	41
2.2.4 Densidade aparente.....	42
2.2.5 Coeficiente de compressibilidade.....	42
2.2.6 Fator de perda.....	43
CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO DOS PAINÉIS DE FIBRAS VEGETAIS.....	46
3.1 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DOS PAINÉIS.....	46
3.1.1 Tratamentos das fibras.....	46
3.1.1.1 Tratamentos nas fibras de coco.....	47
3.1.1.2 Tratamentos nas fibras de dendê.....	50
3.1.1.3 Tratamentos nas fibras de sisal.....	52
3.1.2 Classificação dos painéis.....	53
3.1.2.1 Painéis Unifibra.....	53
3.1.2.2 Painéis Multifibras.....	53
3.1.2.3 Painéis Mesclados.....	54
3.1.3 Compatibilidade das fibras em relação aos aglomerantes utilizados.....	54

3.1.3.1 Cola branca de madeira	55
3.1.3.2 Cola em spray.....	56
3.1.3.3 Soluções de PVC.....	56
3.1.3.4 Cola branca multiuso à base de acrilato e água.....	57
3.1.4 Desenvolvimento dos painéis	58
CAPÍTULO 4 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS E CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA ..	62
4.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS	62
4.1.1 Preparação dos corpos de prova	63
4.1.2 Flamabilidade	63
4.1.2.1 Materiais utilizados para a realização do ensaio de flamabilidade	63
4.1.3 Odor.....	65
4.1.3.1 Materiais utilizados para a realização do ensaio de odor.....	65
4.1.4 Envelhecimento	67
4.1.4.1 Materiais utilizados para a realização do ensaio de envelhecimento	67
4.1.5 Suscetibilidade a fungos (Fungamento)	68
4.1.6 Densidade, gramatura e espessura dos painéis	69
4.2 CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA.....	71
4.2.1 Coeficiente de Absorção Sonora dos painéis	73
4.2.1.1 Materiais utilizados para a realização da caracterização acústica dos painéis	73
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL	93
5.1 INTRODUÇÃO.....	93
5.1.1 Método das imagens ou fontes virtuais	94
5.1.2 Método dos raios acústicos ou traçado de raios	95
5.1.3 Métodos híbridos	95
5.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL	98
5.2.1 Tempo de Reverberação (TR)	98
5.2.2 Tempo de Decaimento Inicial (<i>EDT - Early Decay Time</i>).....	99
5.2.3 Fator de Clareza (C_{80}) e Definição (D_{50}).....	99
5.2.4 <i>RaSTI (Rapid Speech Transmission Index – Índice Rápido de Transmissão da Fala)</i> ..	100
5.2.5 Equipamentos utilizados para realizar as medições <i>in loco</i>	101
5.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS.....	101
5.4 ANÁLISE NUMÉRICA.....	103
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	114
6.1 CONCLUSÕES.....	114

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	116
REFERÊNCIAS	117
APÊNDICE A - MÁQUINA PARA EXTRAÇÃO DE FIBRA DE AÇAÍ	125
APÊNDICE B - PROCESSO DE PRODUÇÃO ARTESANAL E PAINÉIS DE FIBRAS VEGETAIS UTILIZADOS PARA CONTROLE DE RUÍDO.....	133
ANEXO 1 - SIMULANDO NO ODEON 9.2 COMBINED.....	140

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Resíduos do fruto açaí	26
FIGURA 2.2 - Resíduos de coco	26
FIGURA 2.3 - Lixo plástico	27
FIGURA 2.4 - Empresa de beneficiamento de fibras de sisal.....	27
FIGURA 2.5 - Coqueiro (<i>Cocos nucifera</i>)	28
FIGURA 2.6 - (a) Coco maduro <i>in natura</i> e (b) fibras de coco	28
FIGURA 2.7 - Dendezeiro (<i>Elaeis Guineensis</i>)	29
FIGURA 2.8 - (a) Frutos do dendê e (b) sua estrutura interna.....	29
FIGURA 2.9 - Fibras de dendê.....	30
FIGURA 2.10 - (a) Plantação de sisal e (b) transporte das folhas de sisal para extração da fibra.....	31
FIGURA 2.11 - Processo de extração artesanal da fibra do sisal.....	31
FIGURA 2.12 - Processo de extração semi-automatizado	32
FIGURA 2.13 - Processo de secagem das fibras de sisal.....	32
FIGURA 2.14 - (a) Açaizeiro (<i>Euterpe oleracea</i>) e (b) seus frutos	33
FIGURA 2.15 - Absorção sonora promovida por um material acústico	35
FIGURA 2.16 - Mecanismo de absorção de um material acústico poroso	36
FIGURA 2.17 - Mecanismo de absorção de um material acústico fibroso.....	36
FIGURA 2.18 - Principais parâmetros utilizados para caracterizar materiais porosos.....	37
FIGURA 2.19 - Representação da resistência ao fluxo promovida por um material poroso ...	38
FIGURA 2.20 - Representação dos poros de um material acústico poroso	40
FIGURA 2.21 - Visualização dos poros de diferentes materiais acústicos: (a) espuma de melamina reticulada com ampliação de 30 x e (b) espuma de poliuretano com ampliação de 60 x	40
FIGURA 2.22 - Visualização das trajetórias do fluxo potencial (L_S) de ar e do fluxo de ar (L) em um material de tortuosidade unitária	41
FIGURA 2.23 - Visualização de uma região seccionada de um material acústico fibroso.....	41
FIGURA 3.1 - Ciclo do processamento industrial da fibra de coco utilizado pela empresa POEMATEC.....	47
FIGURA 3.2 - Limpeza das fibras de coco	48
FIGURA 3.3 - (a) Máquina de encordoamento e (b) cordas de fibras	48
FIGURA 3.4 - (a) Máquina de mantas e (b) prensa de corte.....	49
FIGURA 3.5 - Autoclave de vulcanização	49

FIGURA 3.6 - Aplicação de agente antichama	50
FIGURA 3.7 - Instalações do LabCQI - CRA.....	51
FIGURA 3.8 - Instalações do LAOS.....	51
FIGURA 3.9 - Fibras de sisal cortadas em diferentes tamanhos.....	52
FIGURA 3.10 - Painéis multicamadas unifibra: de açaí (1), de dendê (2), de coco (3) e de sisal (4)	53
FIGURA 3.11 - Painéis multifibras: coco/sisal.....	53
FIGURA 3.12 - Painéis mesclados: dendê/sisal.....	54
FIGURA 3.13 - Materiais utilizados para confeccionar os painéis, da esquerda para a direita: molde metálico, compressor rotativo e pistola de pintura	54
FIGURA 3.14 - Equipamentos de proteção utilizados durante a fabricação dos painéis.....	55
FIGURA 3.15 - Colas brancas de madeira utilizadas e seus respectivos tipos e fabricantes... 56	
FIGURA 3.16 - Adesivo industrial tipo Super 77 da fabricante 3M.....	56
FIGURA 3.17 - Instalações do Laboratório do Grupo de Ecompósitos.....	57
FIGURA 3.18 - Adesivo industrial <i>Fastbond</i> MR (49).....	57
FIGURA 3.19 - Ciclo de processos utilizados para desenvolver os painéis de fibras vegetais propostos.....	58
FIGURA 3.20 - Fibras <i>in natura</i> e suas impurezas	59
FIGURA 3.21 - Camadas de fibras	59
FIGURA 3.22 - Aplicação de aglomerante sobre as camadas de fibras.....	60
FIGURA 3.23 - (a) e (b) Camadas de fibras sendo prensadas	60
FIGURA 3.24 - Painéis durante a secagem.....	61
FIGURA 4.1 - Corpos de prova (painéis artesanais de sisal tipo fibras longas, sisal tipo fibras pequenas, açaí, dendê e coco).....	63
FIGURA 4.2 - (a) Capela utilizada para o ensaio de flamabilidade e (b) câmara de combustão.....	64
FIGURA 4.3 - Amostras de painéis de fibras vegetais prontas para o ensaio de odor.....	66
FIGURA 4.4 - (a) amostras ensaiadas e (b) estufa com ar circulante	67
FIGURA 4.5 - Pesagem dos painéis.....	69
FIGURA 4.6 - Interior da minicâmara: seus difusores, fonte sonora e suporte do microfone. 74	
FIGURA 4.7 - Cadeia de medição (sistema de aquisição de dados).....	75
FIGURA 4.8 - Instalações do Laboratório de Acústica da UFPA.....	76
FIGURA 4.9 - Comparação entre o NPS devido à fonte no interior da minicâmara e o NRF em um dia típico	77

FIGURA 4.10 - Coeficiente de absorção sonora das superfícies da minicâmara reverberante da UFPA	77
FIGURA 4.11 - Termo-higrômetro digital durante medição de temperatura e umidade relativa em um dia típico	78
FIGURA 4.12 - Gráfico comparativo dos valores de coeficiente de absorção sonora de painéis de fibras de sisal de diferentes comprimentos (0,03 m, 0,07 m, 0,1 m)	79
FIGURA 4.13 - Coeficiente de absorção sonora de um painel artesanal de fibra de dendê	80
FIGURA 4.14 - Comparação entre os coeficientes de absorção sonora de um painel unifibra de dendê e mesclados de dendê/sisal e dendê/açai	81
FIGURA 4.15 - Coeficiente de absorção sonora de um painel artesanal de fibra de açai	82
FIGURA 4.16 - Comparação entre os coeficientes de absorção sonora das faces de um painel multifibras de açai/coco.....	83
FIGURA 4.17 - Comparação entre os coeficientes de absorção sonora das faces de um painel multifibras de sisal FP/coco.....	83
FIGURA 4.18 - Gráfico comparativo dos valores de coeficiente de absorção sonora de painéis de fibras de coco, fabricados por processo artesanal e industrial.....	84
FIGURA 4.19 - Equipamentos utilizados nas medições, da esquerda para a direita: microfone, fonte sonora, medidor de nível de pressão sonora e computador.....	85
FIGURA 4.20 - (a) Câmara reverberante vazia (sem amostras) e (b) com amostras de sisal..	85
FIGURA 4.21 - Gráfico comparativo dos valores de coeficiente de absorção sonora de painéis artesanais de fibras de sisal FP ensaiados em diferentes câmaras reverberantes	86
FIGURA 4.22 - Comparação entre o NPS devido à fonte no interior da câmara reverberante e o NRF em um dia típico	87
FIGURA 4.23 - Coeficiente de absorção sonora das superfícies da câmara reverberante da UFSM	88
FIGURA 4.24 - Coeficiente de absorção sonora de materiais acústicos convencionais.....	88
FIGURA 4.25 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos convencionais e painéis unifibra	89
FIGURA 4.26 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos convencionais e painéis mesclados	90
FIGURA 4.27 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos convencionais e painéis multifibras.....	91
FIGURA 5.1 - (a) Métodos de traçado de pirâmides e (b) de traçado de cones.....	94

FIGURA 5.2 - Fonte sonora (S), Receptor (R), Fontes imagem de primeira (S_1) e segunda ordem (S_{12})	94
FIGURA 5.3 - Traçado de um raio acústico da fonte sonora (F) ao receptor (R).....	95
FIGURA 5.4 - Distribuição de energia do raio incidente pela absorção, reflexão difusa e reflexão especular em um método híbrido	96
FIGURA 5.5 - Espalhamento devido a um refletor côncavo (à esquerda) e um convexo (à direita).....	97
FIGURA 5.6 - Efeito de focalização	97
FIGURA 5.7 - Equipamentos utilizados para realizar as medições de tempo de reverberação, da esquerda para a direita: sistema de aquisição de dados, microfone omnidirecional e fonte sonora	102
FIGURA 5.8 - Sala analisada durante medição de tempo de reverberação (a) sem audiência e (b) com audiência.	102
FIGURA 5.9 - Vista superior do modelo geométrico da sala, apresentado em ambiente computacional.....	104
FIGURA 5.10 - (a) Modelo geométrico da sala e (b) ambiente real	104
FIGURA 5.11 - Comparação dos resultados experimental e numérico obtidos para o tempo de reverberação da sala sem audiência.....	105
FIGURA 5.12 - (a) Sala com audiência e (b) seu respectivo modelo numérico	106
FIGURA 5.13 - Gráfico comparativo dos resultados experimental e numérico obtidos para o parâmetro T_{30} da sala com audiência.....	106
FIGURA 5.14 - Painéis de sisal ($4,45 \text{ m}^2$ de área) colocados na parede do fundo da sala....	107
FIGURA 5.15 - Diferença promovida no parâmetro acústico T_{30} da sala sem audiência devido à colocação dos painéis de fibras de sisal ($4,45 \text{ m}^2$) na parede do fundo	107
FIGURA 5.16 - Determinação do caminho das ondas sonoras utilizando o Método da Fonte Imagem Especular	109
FIGURA 5.17 - Distribuição sonora da sala eliminando as reflexões provenientes da parede do fundo e parte do teto, após a determinação do caminho das ondas sonoras através do Método da Fonte Imagem Especular	109
FIGURA 5.18 - Sala com tratamento acústico proposto	110
FIGURA 5.19 - Sala com tratamento acústico proposto anteriormente e com a capacidade total de alunos na sala.....	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Comparação entre o número de lavagens e a quantidade de óleo residual	52
TABELA 4.1 - Resultados e avaliação das amostras ensaiadas quanto à flamabilidade	65
TABELA 4.2 - Resultados e avaliação das amostras ensaiadas quanto ao odor.....	66
TABELA 4.3 - Resultados e avaliação das amostras ensaiadas quanto ao envelhecimento....	68
TABELA 4.4 - Resultados e avaliação das amostras ensaiadas quanto à susceptibilidade a fungos	69
TABELA 4.5 - Densidade, gramatura e espessura dos painéis.....	70
TABELA 4.6 - Condições de temperatura e umidade relativa do ar, durante as medições de tempo de reverberação, a serem respeitadas.....	78
TABELA 5.1 - Valores experimentais dos parâmetros acústicos da sala com e sem audiência.....	103
TABELA 5.2 - Valores experimentais dos parâmetros acústicos da sala sem audiência, com e sem painéis	108
TABELA 5.3 - Valores esperados para os parâmetros acústicos da sala sem audiência e com tratamentos acústicos diversos	111
TABELA 5.4 - Valores esperados para os parâmetros acústicos da sala com audiência máxima e com tratamento acústico com painéis de fibras de sisal	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AOCS	<i>American Oil Chemists' Society</i>
CRA	Companhia Refinadora da Amazônia
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung - German Institute for Standardization</i>
EDT	<i>Early Decay Time</i>
FMVSS	<i>Federal Motor Vehicle Safety Standards</i>
GVA	Grupo de Vibrações e Acústica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LabCQI	Laboratório de Controle de Qualidade Industrial
LAOS	Laboratório de Operações de Separação
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
NPS	Nível de Pressão Sonora
NR	Norma Regulamentadora
NRF	Nível de Ruído de Fundo
OMS	Organização Mundial de Saúde
PVA	Acetato de Polivinila
PVC	Policloreto de Vinila
<i>RaSTI</i>	Índice Rápido de Transmissão da Fala
<i>STI</i>	<i>(Speech Transmission Index - Índice de Transmissão da Fala)</i>
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
UFPA	Universidade Federal do Pará

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%ALCons$	Percentual de Perda de Articulação de Consoantes
A_a	Absorção sonora de um material
A_2	Absorção total da Câmara Receptora (constante de Sabine)
c	Velocidade do som no meio
C_E	Calor específico do fluido livre
c_p	Velocidade da onda dentro do material poroso
c_0	Velocidade do som no fluido livre
C_{80}	Fator de Clareza
D_{50}	Definição
E_d	Energia Dissipada
E_i	Energia Acústica Incidente
E_r	Energia Refletida
E_t	Energia Transmitida
j	Unidade complexa
L	Trajatória do fluxo de ar se um material possuísse tortuosidade unitária
L_S	Trajatória potencial do fluxo de ar no interior de um material acústico
M_E	Massa específica do fluido livre
N_{Pr}	Número de Prandtl
\overline{NPS}_1	Nível de Pressão Sonora Médio na Câmara Emissora
\overline{NPS}_2	Nível de Pressão Sonora Médio na Câmara Receptora
$p(t)$	Pressão Acústica em um determinado instante
Q	Vazão volumétrica
PT	Perda de Transmissão
P_1	Pressão inicial
P_2	Pressão final
R	Resistência ao fluxo
R^*	Resistência ao fluxo específica
RT_{60}	Tempo de Reverberação referente ao decaimento sonoro de 60 dB
S	Área superficial da amostra
S_{sec}	Área da seção transversal da amostra

S_{DIV}	Área superficial da divisória ou barreira que separa as duas câmaras germinadas
S/N	Relação Sinal/Ruído
T	Temperatura
t_2	Tempo de Reverberação da câmara de recepção
\bar{t}_1	Tempo de Reverberação médio da câmara sem amostra
\bar{t}_2	Tempo de Reverberação médio da câmara com amostra
T_{30}	Tempo de Reverberação referente ao decaimento sonoro de 30 dB
V	Volume da câmara reverberante
V_f	Volume de fluido contido entre os poros de determinada amostra
V_t	Volume total da mesma
Z	Coefficiente de compressibilidade
α	Coefficiente de Absorção Sonora
α_∞	Tortuosidade
β	Difusividade térmica
γ	Razão entre calores específicos
δ	Espessura da camada viscosa
ΔP	Diferença de pressão
ε	Coefficiente de Reflexão
Λ	Comprimento viscoso característico
Λ'	Comprimento térmico característico
κ	Módulo de compressibilidade
μ	Viscosidade do fluido
ν	Viscosidade cinemática
ξ	Coefficiente de Dissipação
ρ_b	Densidade aparente do material
ρ_s	Densidade real do material
ρ_0	Densidade do fluido
σ	Resistividade ao fluxo
τ	Coefficiente de Transmissão
φ	Fator de perda
ϕ	Porosidade
ω	Frequência angular

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A poluição sonora é hoje, depois da poluição do ar e da água, o problema ambiental que afeta o maior número de pessoas. Estas, quando submetidas a níveis exagerados de ruído, podem ser fisiológica e/ou psicologicamente lesionadas, podendo apresentar estresse, dificuldades mentais e emocionais, e até perdas auditivas progressivas, muitas das vezes irreversíveis. Assim, o que antigamente era restrito a situações ocupacionais, hoje é encarado como uma fonte de problemas físicos, psicológicos e sociais (ANDRADE, 2004).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), no ano de 2007, 10% da população mundial (mais de 600 milhões de habitantes) já apresentava algum grau de deficiência auditiva. No Brasil, este número era estimado em 15 milhões de pessoas, sendo o fato mais agravante, segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o de que 350 mil brasileiros apresentavam surdez profunda, não sendo capazes de ouvir nada sem auxílio de aparelhos.

Os problemas causados pelo excesso de ruído, não só em ambientes de trabalho, mas em qualquer ambiente, são de conhecimento de muitos, mas pouco é feito para reduzir os níveis sonoros a valores adequados. Descumprimento ou desconhecimento das normas nacionais vigentes que, de alguma forma, estão relacionadas a ruídos (NR 6, NR 7, NR 15, NR 17, NBR 10151, NBR 10152), falta de conscientização de empregados e empregadores, falta de campanhas de mobilização nacional, altos custos para adequação de ambientes de trabalho a níveis satisfatórios, entre outros, são fatores que agravam ainda mais a condição atual do país.

Objetivando amenizar o grau de poluição sonora de ambientes, técnicas de controle de ruído (ativo, passivo e combinado) foram sendo desenvolvidas ao longo dos anos. Técnicas essas que são, em geral, específicas para cada caso e, que, atualmente, esbarram em um aspecto: o custo, ao qual, até então, não se dava a devida importância em razão dos benefícios obtidos através dessas técnicas (BASTOS, 2007). Assim, soluções alternativas, a começar por novos materiais acústicos que sejam menos custosos e apresentem desempenho satisfatório, surgem como uma ótima opção caso propostas tradicionais sejam inviabilizadas pelo custo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em um tempo em que altos níveis de ruído fazem parte do cotidiano das pessoas, a necessidade de controlá-los não é somente evidente, mas providencial, uma vez que a poluição sonora é, no cenário atual, depois da poluição do ar e da água, o problema que afeta o maior número de pessoas (BASTOS, 2007). Dispositivos acústicos sejam eles painéis, barreiras, etc., quando de alta eficiência, geralmente, são de custosa aquisição, tornando, em muitas das vezes, inviável sua utilização, principalmente, por empresas de pequeno porte e orçamento limitado. Além disso, os materiais existentes no mercado (pelo menos o nacional) ou isolam ou absorvem ondas sonoras, embora com diferentes eficiências. Em outras palavras, aquele material que tem grande poder de isolamento acústico quase não tem poder de absorção acústica, e vice-versa. Outros não possuem nem características de isolamento acústico, tampouco de absorção sonora (como plásticos leves e impermeáveis). Neste âmbito surge a necessidade de se desenvolverem novos materiais, que venham a possuir boas características acústicas (principalmente coeficiente de absorção sonora), boa durabilidade e que apresentem resultados satisfatórios quando utilizados para a finalidade a que se destinam: controle de ruído e de características de campo reverberante em ambientes fechados; e que também possam ser confeccionados, essencialmente, com recursos naturais, mais especificamente a partir de fibras vegetais, as quais existem em abundância no Brasil, são de fácil obtenção e de baixo custo de aquisição quando comparadas a materiais específicos para as finalidades anteriormente citadas.

Cada recinto, conforme sua utilização, requer critérios bem definidos de Níveis de Pressão Sonora e de Reverberação para permitir o conforto acústico e/ou eliminar as condições nocivas à saúde (controle de ruído). O campo sonoro de um ambiente é consequência de várias características, como dimensões, geometria da sala e absorção sonora de suas superfícies, absorção e difusão sonoras promovidas por objetos, potência e diretividade das fontes sonoras, entre outras (SOUZA, 2007). Normalmente, um bom projeto acústico prevê o isolamento e a absorção acústica utilizadas com critérios pré-estabelecidos, objetivando uma melhor eficiência no resultado final, no projeto já realizado. Para isto, devem ser levados em consideração: o desempenho acústico dos materiais que serão utilizados, sua fixação, posição relativa à fonte de ruído e facilidade de manutenção, sem que a funcionalidade do ambiente, em que este material for instalado, fique restringida.

Já se sabe que algumas fibras vegetais possuem características acústicas satisfatórias quando utilizadas para reduzir a reverberação em determinados ambientes fechados. A infraestrutura e os procedimentos necessários para determinar propriedades de painéis acústicos já foram desenvolvidos (MAFRA, 2004) principalmente considerando painéis constituídos por fibras de coco (VIEIRA, 2008).

Ensaio acústicos de divisórias confeccionadas a partir de fibras regionais (fibras de coco e açaí) e compensado foram realizados em câmaras reverberantes germinadas em escala reduzida, a fim de se quantificar sua capacidade de isolamento sonoro, obtendo-se resultados satisfatórios e propondo-se a seguir, ensaios com outras fibras (TOUTONGE, 2006).

Comparações entre coeficientes de absorção sonora de painéis de fibra de coco de diferentes espessuras e densidades e materiais absorvedores acústicos foram feitas em câmara reverberante em escala reduzida, constatando-se que os painéis, em determinadas frequências, possuíam desempenho superior ao dos materiais acústicos convencionais (GUEDES, 2007).

Além de promover o controle de ruído e contribuir para o design acústico em ambientes fechados, os painéis de fibras vegetais possuem, em potencial, grande importância para a região que desenvolve essas atividades, uma vez que proporcionam um aumento na renda da população envolvida com a mão-de-obra necessária para elaborá-los em grande escala, desde a extração das fibras até os ensaios que devem ser realizados nesses painéis. Um assento de carro com fibra vegetal, por exemplo, utiliza pelo menos quatro vezes mais mão-de-obra do que aquele feito de espuma (MARROQUIM, 1994). Outra vantagem das fibras vegetais é a sua atoxidez. A espuma de poliuretano à base de isocianato, por exemplo, libera durante sua combustão um gás (gás cianídrico) altamente tóxico.

Dessa forma, o presente trabalho está inserido no contexto do desenvolvimento de novos materiais acústicos, procurando ampliar e aprofundar os trabalhos desenvolvidos anteriormente, pesquisando a respeito do estado da arte de materiais absorvedores de som não convencionais, testando as diversas possibilidades de mesclas de materiais e investigando a utilização destes em novas aplicações, como pode ser comprovado a partir dos trabalhos que vêm sendo produzidos dentro desta área do conhecimento.

Além do que, considerando-se as tendências ambientalistas globais, esta é uma grande oportunidade de agregação de valor das fibras vegetais e de desenvolvimento tecnológico para países produtores agrícolas, como o Brasil (MATTOSO et. al., 1996), ressaltando também que a utilização de materiais não convencionais é uma tendência internacional denominada de desmaterialização, caracterizada pela não utilização ou pela diminuição das quantidades dos materiais usados ou, ainda, pela substituição por outros mais

leves. Por exemplo, trabalhando-se em casa com o auxílio da Internet ou do telefone, elimina-se o uso de transporte, diminuindo assim o consumo de combustível, caracterizando a desmaterialização. Já no caso deste trabalho, a desmaterialização é caracterizada através da utilização de fibras vegetais ao invés de materiais acústicos convencionais, comercialmente disponíveis.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

- Desenvolver e determinar as características de absorção de painéis confeccionados a partir de fibras vegetais (açai, coco, dendê e sisal) na forma de painéis mesclados, unifibra e multifibras.

1.3.2 Específicos

- Caracterizar os materiais em questão, através da determinação do coeficiente de absorção sonora de materiais;
- Caracterizar os referidos materiais em relação a outras características tais como: flamabilidade, olfatividade (odor), suscetibilidade ao surgimento de fungos (fungamento), etc.;
- Simular numericamente o comportamento acústico do ambiente analisado, através do método híbrido de acústica de raios/fontes imagem especular;
- Validar os modelos desenvolvidos, a partir de comparações com resultados experimentais;
- Avaliar, *in loco*, os painéis desenvolvidos, com base na norma ISO 3382.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho contém 6 capítulos, distribuídos da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo inicial o tema é apresentado, assim como os objetivos e a justificativa do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é feita uma revisão das referências bibliográficas de forma a apresentar os trabalhos mais relevantes e mais recentes produzidos nessa área. São levantadas também informações sobre as fibras com as quais se pretende trabalhar apresentando suas principais características, as quais são relevantes para a finalidade que este trabalho propõe: o controle de ruídos de recintos fechados.

Capítulo 3 – Desenvolvimento dos painéis de fibras vegetais

Este capítulo apresenta os processos utilizados para a elaboração dos painéis bem como os principais aspectos considerados para tal: a compatibilidade das fibras em relação aos aglomerantes utilizados e os tratamentos que as fibras devem receber, quando necessário, para estarem aptas a transformarem-se em painéis, considerando-se ainda as propriedades desejadas no produto final, no que diz respeito às suas características.

Capítulo 4 – Ensaio Experimentais e Caracterização Acústica

Este capítulo fornece a metodologia para a realização de ensaios experimentais nos painéis artesanais produzidos sob outros aspectos que não o aspecto acústico, mas que são de grande importância para atestar que podem ser utilizados para a finalidade de controle de ruído. Apresenta ainda a metodologia para caracterização acústica de materiais em câmaras reverberantes. Por fim, apresenta os resultados obtidos.

Capítulo 5 – Análise numérica e experimental

Neste capítulo, são feitas medições de tempo de reverberação, a fim de validar os modelos numéricos a partir dos resultados obtidos. São utilizados ainda, painéis artesanais em medições *in loco* no intuito de se verificar sua influência nos parâmetros acústicos analisados.

Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações

Apresenta as conclusões do trabalho, relacionando-as com os objetivos propostos e estabelece recomendações para trabalhos futuros.

A bibliografia encerra o presente documento.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FIBRAS NATURAIS

Fibras são materiais muito finos e alongados, como filamentos, que podem ser contínuos ou cortados. Também são muito importantes como matéria-prima para manufatura, podendo ser fiadas, para a formação de fios, linhas ou cordas ou dispostas em mantas, para a produção de papel, feltro ou outros produtos. Toda fibra é um polímero e a classificação é feita levando-se em conta como é esta polimerização. As fibras usadas na manufatura são classificadas conforme a sua origem, que pode ser natural (animal ou vegetal) e artificial ou sintética.

As fibras naturais são fibras retiradas prontas da natureza, sendo as mais comuns o algodão, a lã, a seda, o linho e o rami, todas, fibras vegetais. Fibras vegetais essas que, antigamente, foram largamente empregadas na indústria automobilística, como foi o caso de compósitos de látex de borracha natural reforçado com fibra de coco para uso em estofamentos de automóveis (MARROQUIM, 1994).

Em meados dos anos 60 estes materiais começaram a ser gradativamente substituídos pelas espumas de poliuretano. Essa substituição ocorreu, principalmente, devido à maior produtividade e menor custo da espuma, sem levar em conta o seu menor desempenho e questões sócio-ambientais. Dessa forma, a utilização de fibras naturais, para vários fins, tem sido estimulada pelo alto custo de produção das fibras sintéticas, como a fibra de vidro, por exemplo, refletidos em consumo energético e elevado tempo de degradação. Portanto, para o projeto de um determinado material, é preciso considerar o desempenho dos produtos em todos os níveis e as implicações sócio-ambientais do seu uso (MATTOSO et al., 1996).

Atualmente, as indústrias automotivas e de plásticos estão recuperando o interesse em fibras vegetais, devido às suas vantagens em relação às fibras inorgânicas/minerais as quais são comumente utilizadas na indústria em formulações com diferentes resinas, plásticos e borrachas, além de serem, como dito anteriormente, custosas e, acima de tudo, tóxicas. Assim, a substituição de fibras sintéticas por fibras vegetais vem tomando maiores proporções também pelo fato das fibras vegetais serem de fontes renováveis, biodegradáveis, de baixo custo, mais leves e possuem maior perspirabilidade – capacidade de absorver umidade

proveniente da transpiração humana; quando utilizadas em assentos para automóveis, geram maior conforto, principalmente térmico, pois esquentam menos do que um assento convencional, provocam menor impacto ambiental, sem falar que possuem menor densidade e proporcionam menor desgaste do que as fibras sintéticas nos equipamentos convencionais de processamento de polímeros (MATTOSO et al., 1996).

Quando se trata de coco e açaí, por exemplo, ainda há mais uma vantagem que talvez seja a primordial, que é a questão ecológica, uma vez que parte dos resíduos provenientes de seus frutos (ver Figura 2.1 e Figura 2.2) está sendo retirada da natureza e aproveitada de várias formas, além do aspecto social incluso na geração de emprego e desenvolvimento em pequenas comunidades do país onde essas atividades são realizadas.



Figura 2.1 - Resíduos do fruto açaí.



Figura 2.2 - Resíduos de coco.

Compostos biodegradáveis estão sendo intensamente investigados devido aos problemas de acúmulo de lixo plástico (ver Figura 2.3), porém, necessitam de reforço para

obtenção de boas propriedades mecânicas do produto final obtido, sem comprometer a sua biodegradabilidade (KAPULSKIS; DE JESUS; MEI, 2005).



Figura 2.3 - Lixo plástico.

O sisal, por exemplo, pode ser utilizado de maneira bastante satisfatória para o reforço de peças plásticas com diferentes aplicações na indústria automobilística (MORASSI, 1994; SUINAGA, 2006): revestimentos internos da cabina (teto, parede traseira e portas), apoio de cabeça e encosto de banco, painel de instrumentos, bolsa de ferramentas, enclausuramento de cabina/motor; na fabricação de móveis e eletrodomésticos, na mistura com polipropileno e na construção civil.

A fibra do sisal, beneficiada ou industrializada (ver Figura 2.4), rende cerca de 80 milhões de dólares em divisas internas por ano, além de gerar mais de meio milhão de empregos diretos e indiretos por meio de sua cadeia produtiva, sendo o cultivo dessa planta um dos principais agentes de fixação do homem à região semi-árida nordestina (BELTRÃO, 1999).



Figura 2.4 - Empresa de beneficiamento de fibras de sisal.

2.1.1 Fibra de coco

O coqueiro (*Cocos nucifera*) é um membro da família Arecaceae (família das palmeiras). É uma árvore que pode crescer até 30 m de altura, com folhas pinadas de 4 a 6 m de comprimento, com pinas de 60 a 90 cm (ver Figura 2.5).



Figura 2.5 - Coqueiro (*Cocos nucifera*).

É do fruto do coqueiro (ver Figura 2.6a) que se extrai a fibra de coco (ver Figura 2.6b). A extração da fibra de coco, quando realizada no Estado do Pará, é feita em agroindústrias comunitárias do interior que comercializam o produto diretamente no mercado local, para indústrias que processam a fibra. Fibra esta que pertence à família das fibras duras, tais como o “sisal”, ou seja, é uma fibra multicelular que tem como principais componentes, a celulose e o lenho, o que lhe confere elevados índices de rigidez e dureza em relação às outras fibras, o que a torna propícia para os mercados de isolamento térmico e acústico face às suas características. Além disso, a fibra de coco é também um material versátil, devido à sua resistência, durabilidade e resiliência (SALVADOR, 2001; VIEIRA, 2008).



Figura 2.6 - (a) Coco maduro *in natura* e (b) fibras de coco.

Na forma de painéis, industrialmente fabricados, as fibras de coco são recicláveis, biodegradáveis, não deformáveis, duráveis (10 anos, em média, conservando suas propriedades) e contém tanino, um fungicida natural; possuem baixa condutividade ao calor, boa resistência ao impacto e às bactérias, é inodora, resistente à umidade, não é atacada por roedores, não apodrece, não produz fungos, e possui comportamento ao fogo classe B2 (combustibilidade normal) - DIN 4102.

2.1.2 Fibra de dendê

O dendezeiro (*Elaeis Guineensis*) é uma planta da família das palmáceas. Originário das regiões tropicais da África, onde pode adquirir grande importância econômica em virtude dos óleos vegetais que podem ser extraídos dos seus frutos uma vez que os postos de trabalho gerados vão desde a extração dos frutos até a comercialização dos óleos extraídos, essa planta pode atingir até 20 m de altura, formando copas densas (ver Figura 2.7).



Figura 2.7 - Dendezeiro (*Elaeis Guineensis*).

Seus frutos são de cor alaranjada (ver Figura 2.8a), e a semente ocupa totalmente o fruto (ver Figura 2.8b). Seu rendimento é muito grande uma vez que se produz 10 vezes mais óleo que a soja, 4 vezes mais que o amendoim e 2 vezes mais que o coco.

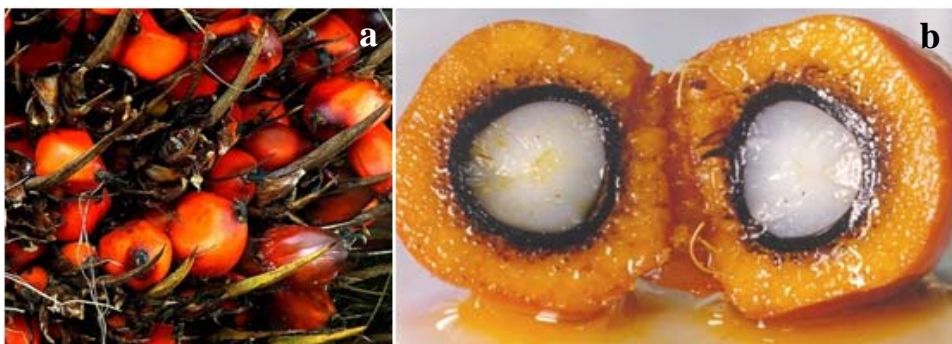


Figura 2.8 - (a) Frutos do dendê e (b) sua estrutura interna.

As fibras (ver Figura 2.9) são obtidas após a etapa de prensagem dos frutos para obtenção do óleo e representam cerca de 11% do peso dos cachos, cheios de frutos, que entram em processamento e são obtidas com um teor de umidade da ordem de 40%. O teor de óleo de palma na fibra pode variar entre limites muito amplos, conforme as condições de processamento e da variação genética do fruto, podendo considerar-se valores típicos entre 8 e 12% do peso das fibras secas, sendo que nos processos mais eficientes esse teor atinge o percentual máximo de 6%. Suas maiores fibras possuem, aproximadamente, 45 mm de comprimento (RITTNER, 1996).



Figura 2.9 - Fibras de dendê.

Primordialmente, as fibras de dendê são utilizadas como combustíveis em fornalhas de caldeiras, gerando energia e vapor de baixa pressão a ser utilizado no processo de extração de óleo de palma. Elas também podem ser submetidas a um processamento complementar para recuperação do óleo de palma nelas contido e resultar em uma fibra com teor de óleo de, no máximo, 1%. Porém, a recuperação deste óleo exige um processo de extração por solvente cujas instalações são de custo elevado, assim como os custos operacionais envolvidos, que não despertam interesse comercial.

2.1.3 Fibra de sisal

O sisal, de nome científico *Agave Sisalana Perrine*, é uma planta originária do México e cultivada em regiões semi-áridas nos países em que existe. Do sisal, utiliza-se principalmente a fibra das folhas (ver Figura 2.10a) que, após o beneficiamento, é transportada (ver Figura 2.10b), geralmente, para indústrias, de cordas, barbantes, tapetes, estofamentos, artesanatos, entre outros. A fibra de sisal se destaca entre as fibras foliares, em termos de qualidade e de aplicação comercial, e também por apresentar um dos maiores módulos de elasticidade dentre as fibras vegetais. Estudos mostram que o sisal pode ser

utilizado como reforço para polímeros comerciais tais como o polietileno e borracha natural. O Brasil é o maior produtor de sisal do mundo e cerca de meio milhão de pessoas dependem dessa cultura para sobreviver (BELTRÃO et al., 1999). A fibra de sisal é a fibra vegetal mais dura que existe e sua classificação é feita em grau crescente de qualidade em três tipos: T1, T2 e T3 (em cada tipo as fibras são classificadas seletivamente pelo comprimento e qualidade).

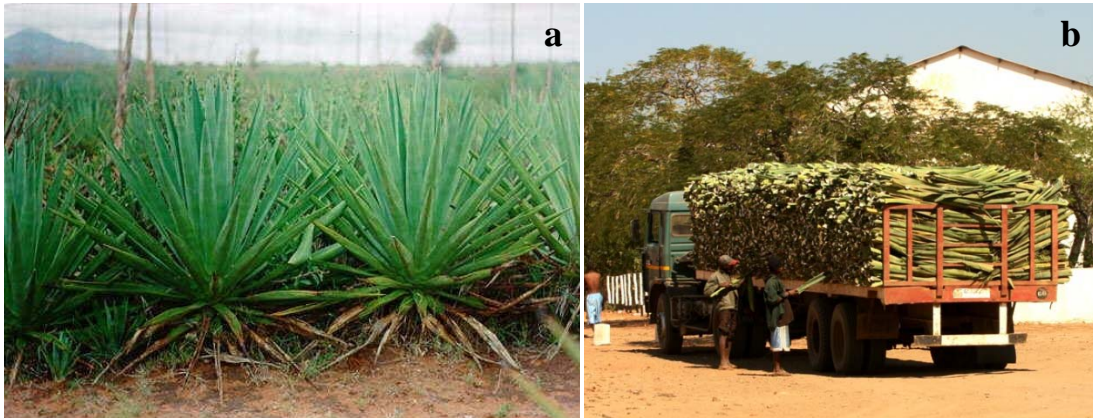


Figura 2.10 - (a) Plantação de sisal e (b) transporte das folhas de sisal para extração da fibra.

O ciclo de transformação do sisal em fios naturais tem início aos 3 anos de vida da planta, ou quando suas folhas atingem cerca de 140 cm de comprimento. Dessa forma, podem resultar em fibras de 90 a 120 cm. As fibras representam apenas 4 a 5% da massa bruta da folha do sisal. A transformação em fibras a partir de suas folhas começa com o processo de desfibramento – processo em que se separa a polpa das fibras – e não requer a utilização de produtos químicos em nenhuma das etapas (ver Figura 2.11).



Figura 2.11 - Processo de extração artesanal da fibra do sisal.

Mesmo a extração por processo semi-automatizado (ver Figura 2.12) não promove modificações nas fibras, sendo importante também, evitar contaminações das fibras por óleo ou outras substâncias.



Figura 2.12 - Processo de extração semi-automatizado.

Em seguida, as fibras são lavadas, secas (ver Figura 2.13) e enfardadas antes de seguirem para a indústria.



Figura 2.13 - Processo de secagem das fibras de sisal.

Por outro lado as tramas de sisal apresentam algumas características inconvenientes, por exemplo, como as outras fibras naturais, o sisal é inflamável, no entanto, não é um bom propagador, pois é autoextinguível e transforma-se rapidamente em carvão, decompondo-se em torno dos 160 °C. Em relação à qualidade do ar, possui características como, acúmulo de poeira e resíduos entre as tramas e desprendimento de fios, por exemplo; apresenta também baixa resistência à umidade, propiciando assim, quando em contato com umidade, o surgimento de bolores – uma designação comum dada a fungos filamentosos – ou mofo, além de odor desagradável.

2.1.4 Fibra de açaí

O açaizeiro (ver Figura 2.14a), cujo nome científico é *Euterpe oleracea*, é uma palmeira tropical nativa da Amazônia Brasileira, e pode ser considerada como a palmeira de maior importância econômica, social e cultural da região Norte do Brasil, pois os produtos derivados do seu fruto (ver Figura 2.14b) vão do gênero alimentício ao farmacêutico. No país, o açaizeiro é típico dos seguintes estados: Amazonas, Amapá, Pará, Acre, Maranhão e até do Paraná.



Figura 2.14 - (a) Açaizeiro (*Euterpe oleracea*) e (b) seus frutos.

A fibra do açaí é extraída do caroço do fruto já sem polpa. O método de extração mais utilizado é o manual. Desenvolveu-se, porém, um método de extração semi-automatizado para a realização desta operação (ver APÊNDICE A – MÁQUINA PARA EXTRAÇÃO DE FIBRA DE AÇAÍ – deste trabalho) a partir de uma máquina utilizada para outra finalidade, que consiste em processar o caroço do fruto em questão, já sem polpa e previamente lavado, para a obtenção das fibras, visando maior eficiência ao processo, a qual serviu de ferramenta para outros trabalhos e projetos. A utilização da fibra para os fins propostos neste trabalho é obtida desde que passe por lavagem prévia e em seguida seja armazenada e seca em estufa, na temperatura de 80 °C (MARTINS; MATTOSO; PESSOA, 2005), pois dessa forma evita-se que a fibra apodreça ou sofra alteração em alguma de suas propriedades.

A utilização de fibras vegetais seja em compostos plásticos (MANO, 2005), seja associada a materiais cimentícios, melhora, comprovadamente, o desempenho desses materiais, potencializando algumas de suas propriedades como, por exemplo, a resistência ao impacto (PINTO et al., 2005) e a cargas dinâmicas (LIMA et al., 2007), à medida que incrementa outras, como biodegradabilidade. Nesse sentido, a mistura de fibras neste trabalho

é proposta não só para proporcionar diferentes utilidades para determinadas fibras como, por exemplo, a de dendê que é utilizada tão somente como combustível para fornalhas de caldeiras, mas também para tentar proporcionar propriedades sinérgicas ao composto de fibras da qual o painel será constituído. Por exemplo, a fibra de açaí possui resistência térmica maior que a fibra de dendê. Neste caso, um painel composto por essas duas fibras, dependendo do percentual de massa de cada fibra, poderia apresentar uma resistência térmica suficiente para suportar determinadas temperaturas e tipos de chamas. A fibra de sisal, que confere maior resistência e maior durabilidade a compostos plásticos (MARTINS; MATTOSO, 2004; MARTINS et al., 2004), poderia tornar um painel constituído por outra fibra vegetal mais resistente e mais durável, etc.

2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Brasil é um país com condições climáticas favoráveis à agricultura, possui solos férteis e abundantes, e devido à sua grande extensão territorial, abriga uma flora com diversas espécies vegetais, e dela são retirados vários produtos e subprodutos naturais. Alguns desses produtos não são totalmente aproveitados e por isso seus resíduos acabam chegando a outros setores industriais, como é o caso de algumas fibras naturais, por exemplo, a fibra de coco, a qual serve desde estofamento para banco de automóveis a palmilhas para calçados (VIEIRA, 2008).

No âmbito acústico, as fibras vegetais são utilizadas, principalmente, como matéria-prima para a fabricação de painéis ou mantas, utilizadas para a finalidade de controle de ruído quando de sua utilização como material de revestimento interno das paredes de ambientes, favorecendo o conforto acústico destes, uma vez que devem satisfazer condições acústicas de acordo com suas finalidades. Por exemplo, igrejas, auditórios, salas de aula, etc., devem ter inteligibilidade máxima; já no caso de fábricas e oficinas, estas devem ter níveis de pressão sonora abaixo do limite permitido para oito horas diárias (neste caso, 85 dBA de acordo com a norma NR – 15); teatros, estúdios de gravação, TV e rádio, também devem ter características acústicas adequadas (MAFRA, 2004).

Para se controlar ruídos é fundamental dispor de elementos que absorvam energia sonora. Os materiais considerados bons absorvedores acústicos são normalmente porosos e/ou fibrosos (TARNOW, 1996; NUNES, 2001), leves e apresentam melhor estrutura de espaços vazios ou microcavidades (OLIVEIRA; TEODORO, 2005). Estes materiais são compostos por duas fases: a sólida, constituída geralmente por fibras ou espumas, ou por outro tipo de material que forma o esqueleto; e a fase fluida contida no interior dos poros ou interstícios

(geralmente o ar). Em tais materiais a dissipação da energia sonora se dá através da interação entre as duas fases, convertendo energia sonora em calor através de: meios viscosos, os quais estão associados às camadas de contorno viscosas criadas pelo cisalhamento do fluido em regiões próximas a superfície das fibras; meios térmicos, os quais se relacionam com as camadas de contorno térmicas originadas pelos fluxos de calor que ocorrem entre o fluido e as fibras; e por meios estruturais quando de perdas associadas à flexão das fibras que formam a estrutura (LOPES, 2006). Resumidamente, nestes materiais parte da energia acústica incidente é dissipada em energia térmica através da viscosidade do ar, enquanto que uma pequena parte é transmitida através do material, fazendo com que a energia refletida apresente intensidade reduzida. Esse fenômeno (ver Figura 2.15) ocorre tanto em materiais porosos quanto em materiais fibrosos, só que por mecanismos diferentes.

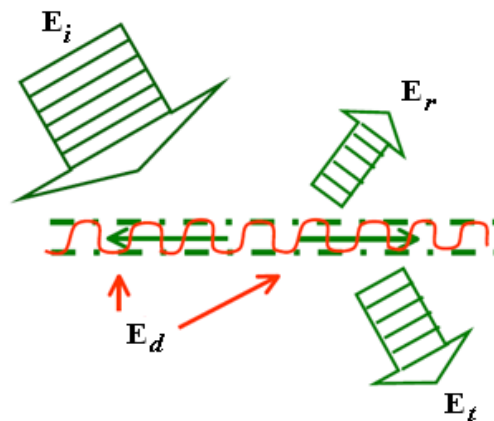


Figura 2.15 - Absorção sonora promovida por um material acústico.

Em que:

E_i é a energia acústica incidente

E_r é a energia refletida

E_d é a energia dissipada

E_t é a energia transmitida

Assim, pode-se escrever a Eq. (2.1), a qual estabelece que a energia acústica incidente, ou energia total (E_i), é igual à soma das parcelas de energia refletida (E_r), dissipada (E_d) e transmitida (E_t):

$$E_i = E_r + E_d + E_t \quad (2.1)$$

e dividindo-se os termos da Equação (2.1) pela energia total (E_i) tem-se a Equação (2.2):

$$1 = \varepsilon + \xi + \tau \quad (2.2)$$

em que ε é o coeficiente de reflexão, ξ é o coeficiente de dissipação e τ o coeficiente de transmissão.

Nos materiais porosos a energia acústica incidente entra pelos poros e dissipa-se por reflexões múltiplas e atrito viscoso, transformando-se em energia térmica (ver Figura 2.16).

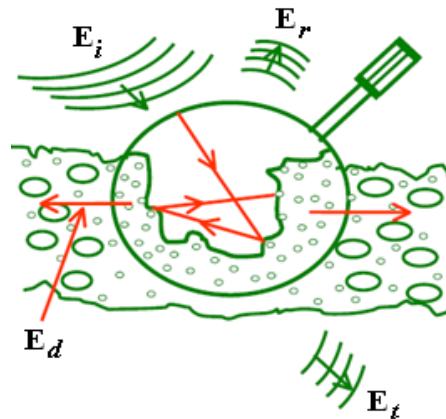


Figura 2.16 - Mecanismo de absorção de um material acústico poroso.

Já nos materiais fibrosos, a energia acústica incidente entra pelos interstícios das fibras, fazendo-as vibrar junto com o ar, dissipando-se assim, em energia térmica devida ao atrito gerado pela excitação das fibras (ver Figura 2.17).

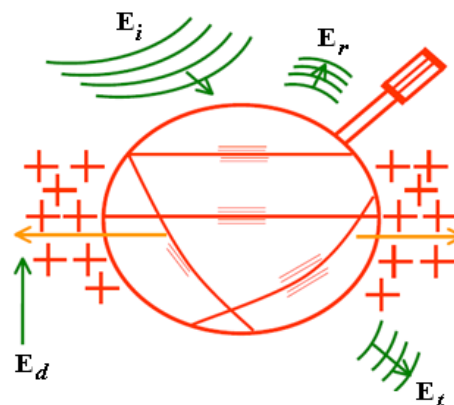


Figura 2.17 - Mecanismo de absorção de um material acústico fibroso.

Na manufatura desses materiais, normalmente, controla-se a absorção pela seleção de espessura, densidade, porosidade, resistência ao fluxo de ar e orientação das fibras. Os materiais mais utilizados como absorventes sonoros são fibras minerais e cerâmicas, espumas elastoméricas e, mais recentemente, fibras vegetais (MAFRA, 2004; GUEDES, 2007; VIEIRA, 2008; BASTOS et al., 2009).

A partir desses materiais, podem ser produzidas unidades pré-fabricadas, como painéis ou placas prontas para a instalação em superfícies de ambientes. Alternativamente, alguns produtos podem ser acrescentados e/ou substâncias podem ser borrifadas ou espalhadas diretamente sobre as superfícies do material absorvedor, haja vista que, alguns fatores não-acústicos também são considerados nos projetos visando contemplar aspectos como segurança, saúde e estética (OLIVEIRA; TEODORO, 2005). Nesses casos, são adicionados elementos que alteram as suas características acústicas, por exemplo: aditivos antichama, aditivos antifungo, revestimentos de filme plástico ou tecidos, pinturas decorativas, placas metálicas perfuradas, etc. No entanto, toda a diversidade dos materiais produzidos requer um controle na sua produção e instalação para assegurar as propriedades adequadas utilizadas nos projetos.

Muitos materiais absorvedores sonoros são fisicamente anisotrópicos (ALLARD et al., 2009), fato este, comprovado pela divergência apresentada através de resultados obtidos para determinados parâmetros de amostras distintas retiradas de regiões próximas de uma única peça de material poroso (LOPES, 2006); possuem complexidade estrutural e geométrica. Dessa forma, a predição de seus comportamentos acústicos torna-se muito difícil, sendo necessário, caracterizá-los através de parâmetros físicos macroscópicos mensuráveis. Portanto, os principais parâmetros utilizados para caracterizar o comportamento acústico de diferentes materiais porosos são apresentados a seguir (ver Figura 2.18).

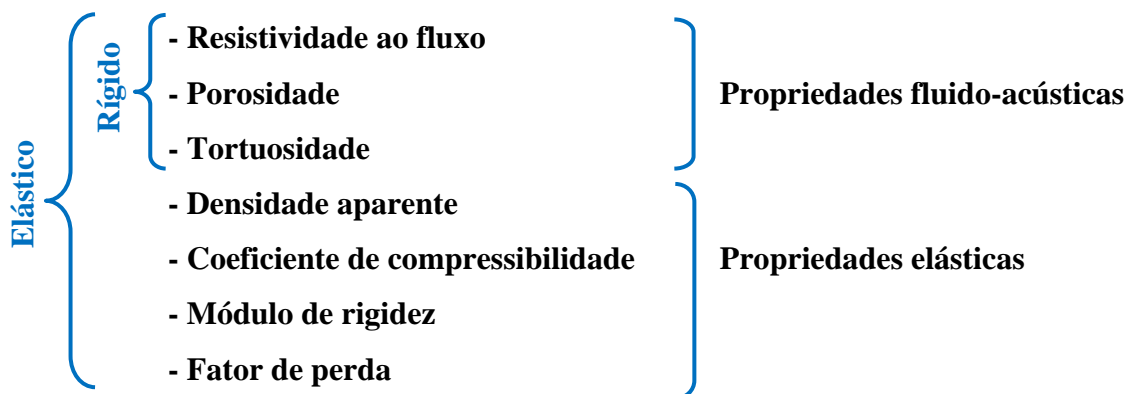


Figura 2.18 - Principais parâmetros utilizados para caracterizar materiais porosos.

Fonte: LOPES, 2006.

De acordo com o esquema apresentado na Figura 2.18, a resistividade ao fluxo, a porosidade e a tortuosidade são as propriedades físicas macroscópicas mais importantes de um material poroso, pois constituem as suas propriedades fluido-acústicas. O desempenho de vários materiais de absorção pode ser determinado através destas propriedades, como no caso de um material poroso rígido.

As definições das propriedades anteriormente mencionadas são apresentadas a seguir, assim como as equações que as determinam, ressaltando o fato de que vários são os métodos utilizados para determiná-las. Em cada um deles são utilizadas condições de contorno específicas buscando simplificar os fenômenos que ocorrem em um material acústico por meio de modelos matemáticos que representam satisfatoriamente a condição real.

2.2.1 Resistência ao fluxo

A resistência ao fluxo é definida como a razão entre a variação da pressão medida entre dois lados do material poroso e a vazão de ar através do mesmo (ver Equação 2.3); é dada em *ohm* acústico [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^5$] no Sistema Internacional (S.I.).

$$R = \frac{\Delta P}{Q} \quad (2.3)$$

em que ΔP (Pa) é a diferença de pressão e Q (m^3/s) é vazão volumétrica. A Figura 2.19 representa a resistência ao fluxo promovida por um material poroso no qual a pressão inicial (P_1) fica reduzida à pressão final (P_2) ao atravessar o material quando se aplica uma vazão volumétrica constante Q .

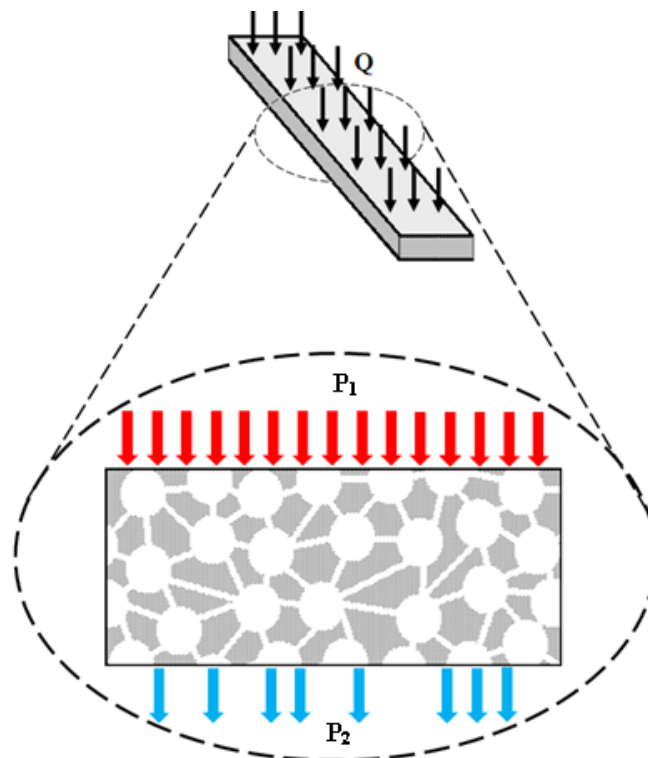


Figura 2.19 - Representação da resistência ao fluxo promovida por um material poroso.

Fonte: CEDERBAUM; LI; SCHULGASSER, 2000.

2.2.1.1 Resistência ao fluxo específica e Resistividade ao fluxo

A partir da resistência ao fluxo, podem ser determinadas duas outras grandezas: a resistência ao fluxo específica e a resistividade ao fluxo. A Resistência ao fluxo específica é o produto entre a resistência ao fluxo e a área da seção transversal da amostra. É equivalente à razão entre a diferença de pressão e a velocidade linear do fluxo de ar através do material (ver Equação 2.4); é dada em *rayl* [N.s/m^3].

$$R^* = \frac{\Delta P}{Q} \cdot S_{\text{sec}} \quad (2.4)$$

em que S_{sec} (m^2) é a área superficial do material.

Já a Resistividade ao fluxo, é a razão entre a resistência ao fluxo específica e a espessura de um dado material (ver Equação 2.5), e é dada em *rayl/m* ou Pa.s/m^2 [N.s/m^4].

$$\sigma = \frac{\Delta P \cdot S}{Q \cdot d} \quad (2.5)$$

em que d (m) é a espessura do material.

Microscopicamente, a resistência ao fluxo resulta da formação de camadas de contorno viscosas devido ao fluxo de fluido sobre cada fibra, e da quantidade de cisalhamento que ocorre nestas camadas. Assim, a quantidade de força viscosa por unidade de massa das fibras, exercida pelo fluxo no meio fibroso, aumenta na medida em que o raio médio da fibra diminui. Dessa forma, a resistividade ao fluxo representa a capacidade de dissipação viscosa do som (MAFRA, 2004; VIEIRA, 2008).

Quando se trata especificamente de absorção sonora, a resistência ao fluxo (R) é o mais importante parâmetro dentre os anteriormente mencionados, pois, as resistividades ao fluxo de materiais frequentemente utilizados em controle de ruído apresentam uma grande variação, localizando-se na faixa de 10^3 Rayls/m até 10^6 Rayls/m (LOPES, 2006), assim, o desempenho acústico de um material pode variar consideravelmente devido a essa grande variação desse parâmetro.

A resistividade ao fluxo depende da porosidade e da tortuosidade do material, porém, para materiais com alta porosidade e baixa tortuosidade, a uma densidade aparente constante, sua resistividade ao fluxo se aproxima de uma relação inversamente proporcional ao quadrado do raio das fibras, ou da espessura dos canais. Dessa forma, um elevado número de fibras com pequenos diâmetros, resulta em uma resistividade maior do que a de um pequeno número de fibras com elevados diâmetros (BOLTON; KANG, 1997).

2.2.2 Porosidade

A porosidade (ϕ) consiste na razão entre o volume de fluido contido entre os poros de determinada amostra e o volume total da mesma. Portanto, trata-se de um parâmetro adimensional, apresentando valores entre 0 e 1 (ou de 0 a 100%) como pode ser visto a seguir na Eq. (2.6).

—

A porosidade dos materiais comumente utilizados, tais como, espumas de poliuretano e fibra de vidro, é elevada, porém variam pouco, de 0,90 a 0,98. Devido a essa estreita faixa de variação, este parâmetro não é o parâmetro mais importante utilizado na diferenciação ou seleção de materiais absorvedores sonoros. A Figura 2.20 representa os poros de um material acústico poroso, enquanto que a Figura 2.21 mostra, com detalhes, os poros de diferentes materiais acústicos em diferentes resoluções.

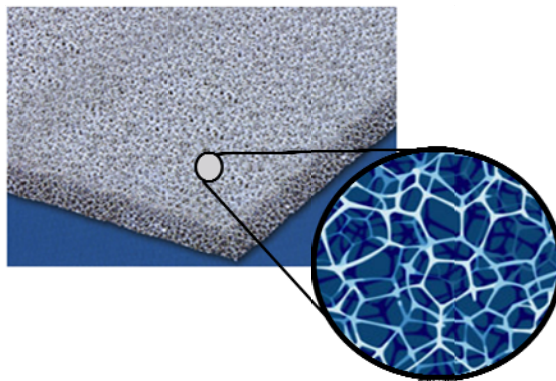


Figura 2.20 - Representação dos poros de um material acústico poroso.

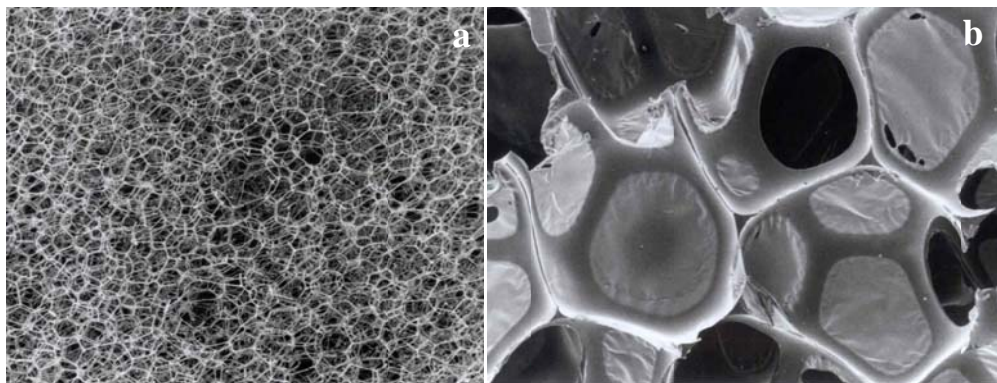


Figura 2.21 - Visualização dos poros de diferentes materiais acústicos: (a) espuma de melamina reticulada com ampliação de 30 x e (b) espuma de poliuretano com ampliação de 60 x.

Fonte: www.hull.ac.uk/acoustics/r7.htm.

2.2.3 Fator estrutural e Tortuosidade

A tortuosidade pode ser definida como uma medida do desvio interno do eixo dos poros em relação à direção de propagação interna da onda no meio, e da não uniformidade dos poros ao longo de seu comprimento (BOLTON; KANG, 1997). O menor valor encontrado para a tortuosidade é a unidade, sendo que materiais fibrosos como fibras de vidro, por exemplo, tipicamente apresentam valores ligeiramente maiores que este, cerca de 1,5 ou menos. Por outro lado, no caso de algumas espumas, estas podem apresentar uma tortuosidade elevada, acima de 10, assim como no caso de materiais acústicos relativamente densos, como gessos acústicos, cerâmicas e alumínio poroso. Na Figura 2.22, o termo L_s representa a trajetória potencial do fluxo de ar no interior de um material acústico, enquanto que o termo L representa a trajetória do fluxo de ar se esse material possuísse tortuosidade unitária. Já na Figura 2.23 é mostrada uma região seccionada de um material acústico fibroso.

Figura 2.22 - Visualização das trajetórias do fluxo potencial (L_s) de ar e do fluxo de ar (L) em um material de tortuosidade unitária.

Fonte: http://www.groundwatersoftware.com/v9_n10_tortuosity.htm#SS.

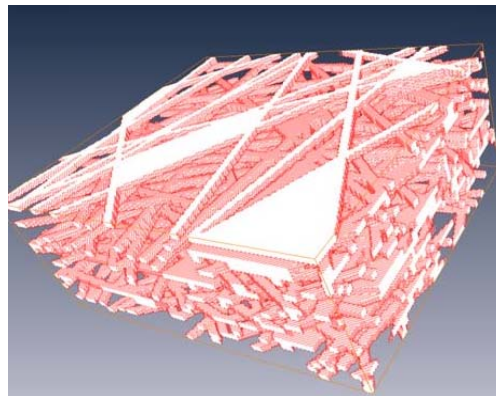


Figura 2.23 - Visualização de uma região seccionada de um material acústico fibroso.

Fonte: http://mae.eng.uci.edu/seminars/2007-2008/images/Abstract_img_1.jpg.

Em todo material absorvedor sonoro, seja ele fibroso ou poroso, as fases, sólida (esqueleto do material) e fluida, estão acopladas inercialmente (CEDERBAUM; LI; SCHULGASSER, 2000). O parâmetro utilizado para quantificar o acoplamento inercial corresponde ao componente do fator estrutural, independente da frequência (ZWIKKER; KOSTEN, 1949). O fator de estrutura é formado por dois componentes, um dependente da frequência, que representa uma adição aparente à densidade do gás devido a sua fricção interna. O outro componente representa o aumento do gradiente de pressão necessário para manter a mesma velocidade média de partícula da seção transversal, devido às variações de aceleração a que o fluido é submetido quando é forçado a se propagar através de trajetórias não lineares e das expansões e contrações dos poros. Este último componente está diretamente ligado à estrutura interna do material, e é comumente denominado de tortuosidade α_∞ .

Em frequências suficientemente altas, o esqueleto fica imóvel devido à grande diferença de densidade entre o fluido e o esqueleto, dessa forma, a onda gerada passa a se propagar somente através do fluido contido entre os poros, possibilitando que a tortuosidade possa ser determinada a partir da Eq. (2.7) que relaciona a velocidade da onda dentro do material poroso c_p e o fator de perda ϕ .

$$\alpha_\infty = \left(\frac{c_0}{c_p} \right)^2 (1 - 2\phi) \quad (2.7)$$

em que c_0 é a velocidade do som no fluido livre (geralmente ar).

2.2.4 Densidade aparente

A Densidade aparente é definida como a razão entre a massa e o volume total expandido de uma dada amostra porosa. Este parâmetro se relaciona com a porosidade da seguinte forma (ver Equação 2.8):

$$\rho_b \approx (1 - \phi)\rho_s \quad (2.8)$$

em que ρ_b corresponde à densidade aparente do material e ρ_s à densidade real do material.

2.2.5 Coeficiente de compressibilidade

Compressibilidade é a capacidade de um corpo ou substância em reduzir o seu volume quando se encontra submetido a determinadas pressões. O módulo de compressibilidade consiste na medida da rigidez de uma substância ou da energia necessária

para produzir uma dada deformação, sendo definido como a razão da variação da pressão correspondente a uma fracionária compressão do volume (ver Equação 2.9).

$$\kappa = -V \frac{dP}{dV} \quad (2.9)$$

em que dP é um infinitesimal de pressão e dV um infinitesimal de volume.

Meios porosos flexíveis como espumas de poliuretano, por exemplo, não podem ser considerados materiais de estrutura rígida, devido à capacidade que o seu esqueleto possui em permitir a propagação de ondas sonoras, independente do fluido intersticial. O coeficiente de compressibilidade da fase sólida deste material é da mesma ordem que o da fase fluida, entretanto desempenham papéis distintos no processo de propagação da onda sonora. Resumidamente, o coeficiente de compressibilidade indica quanto um fluido ou estrutura podem ser comprimidos (ver Equação 2.10).

$$Z = \rho_0 \frac{\partial P}{\partial \rho} \quad (2.10)$$

2.2.6 Fator de perda

O fator de perda de energia, a exemplo do decremento logarítmico utilizado em vibrações mecânicas, relaciona o quanto de energia é dissipado pelo material a cada ciclo. O fator de perda é proporcional à relação da energia dissipada por ciclo com a energia média armazenada pelo tempo. Às vezes é definido como ângulo de fase do complexo módulo de Young de elasticidade (CARNESECA, 2006), conforme Equação (2.11).

$$\varphi = \frac{\delta}{2} \left(\frac{1}{\Lambda} + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{N_{Pr} \Lambda'}} \right) \quad (2.11)$$

Em altas frequências o número de onda complexo no material está relacionado com a tortuosidade (ALLARD, J. F.; CASTAGNÈDE, B.; HENRY, 1994) da seguinte forma (ver Equação 2.12):

$$k_p = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\alpha_\infty} \left[1 + \frac{\delta(1-j)}{2} \left(\frac{1}{\Lambda} + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{N_{Pr} \Lambda'}} \right) \right] \quad (2.12)$$

em que j é a unidade complexa, ω representa a frequência angular, c_0 a velocidade do som no fluido livre, Λ o comprimento viscoso característico, Λ' o comprimento térmico característico,

γ a razão entre calores específicos, N_{Pr} o número de Prandtl, definido pela Equação (2.13), e δ a espessura da camada viscosa, definida pela Equação (2.15):

$$N_{Pr} = \frac{\nu}{\beta} \quad (2.13)$$

em que ν é a viscosidade cinemática e β é a difusividade térmica, definida pela Equação (2.14), a seguir:

$$\beta = \frac{k}{M_E C_E} \quad (2.14)$$

em que k é a condutividade térmica do fluido, M_E a massa específica e C_E o calor específico.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho_0 \omega}} \quad (2.15)$$

em que μ é a viscosidade do fluido e ρ_0 a densidade do fluido.

Os comprimentos viscoso (Λ) e térmico (Λ') característicos expressam interações entre o fluido e a estrutura (FELLAH et al., 2003) e para quase todos os materiais acústicos, a condição $\Lambda \leq \Lambda'$ é válida (SHRAVAGE; BONFIGLIO; POMPOLI, 2008), ou seja, as interações viscosas ocorrem em menor proporção ou, no máximo, nas mesma proporção que as interações térmicas, na maioria dos materiais acústicos. Estes comprimentos característicos são definidos a partir das equações que definem o ângulo de perda (Equação (2.11)) e a velocidade da onda dentro do material, obtida pela Equação (2.16).

$$c_p = \frac{c_0}{\sqrt{\alpha_\infty}} \left[1 - \frac{\delta}{2} \left(\frac{1}{\Lambda} + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{N_{Pr} \Lambda'}} \right) \right] \quad (2.16)$$

Várias são as técnicas existentes utilizadas para determinar as referidas propriedades, para diversos materiais acústicos, cada uma com sua metodologia, considerações e exigências, possibilitando um estudo mais detalhado e aprofundado desses materiais. No entanto, todas esbarram na dificuldade em relacionar parâmetros microscópicos a propriedades físicas macroscópicas, uma vez que existem poucas informações disponíveis relacionando a microestrutura de um material com suas propriedades macroscópicas (LOPES, 2006). O que implica diretamente em uma limitação quando da concepção de materiais acústicos mais eficientes através da manipulação de tais parâmetros (SHRAVAGE; BONFIGLIO; POMPOLI, 2008), ficando a cargo da manipulação de outros parâmetros a potencialização

das propriedades acústicas de um material.

Por exemplo, no caso de painéis constituídos por fibras vegetais, estes não são considerados, pelo menos por enquanto, materiais acústicos convencionais. Ainda que haja algumas empresas produtoras desses painéis no país e sua produção seja, relativamente, em grande escala, nenhuma dessas empresas concebe esses painéis com a finalidade de controle de ruído; a prova maior disto é que nenhuma das referidas empresas fornece a curva de coeficiente de absorção sonora desses materiais em função da frequência. O que acontece é que, alguns desses materiais, por possuírem bom desempenho acústico, principalmente no que se refere à capacidade de absorção sonora, ocasionalmente obtida pelo processo produtivo e pelas características dos materiais envolvidos, acabam sendo utilizados para essa finalidade. Ocorre também dessas empresas modificarem alguns parâmetros durante o processo de fabricação, como a espessura do painel ou densidade, por exemplo, para atender a uma determinada demanda, e isso acaba potencializando a capacidade de absorção sonora desse painel sem que seja essa a intenção do fabricante.

Em outras palavras, conceber um material (absorvedor) acústico é substancialmente diferente de conceber um material utilizado para a finalidade de controle de ruído. No processo de fabricação do primeiro, os parâmetros envolvidos são ajustados para resultarem na melhor eficiência, pois sua função primordial é a de um material acústico. No processo de fabricação do segundo, tenta-se agregar características acústicas ao material sem se preocupar em conseguir a melhor eficiência quando do ajuste dos parâmetros do processo produtivo, pois desempenhar o papel de um material acústico é apenas uma de suas funções secundárias. Contudo, considerando-se a diversidade de fibras naturais existentes no Brasil e suas características (MAFRA, 2004; NEIRA, 2005; VIEIRA, 2008; BASTOS et al., 2009), e que dentre essas fibras, muitas podem ser utilizadas como matéria-prima na fabricação de painéis utilizados para controle de ruído, pode-se afirmar que há, no país, um grande potencial, ainda inexplorado, para o desenvolvimento de novos materiais absorventes sonoros (SANTOS, 2005), que, se utilizado adequadamente, pode melhorar as características dos materiais já existentes ou ainda substituí-los por novos e melhores materiais.

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO DOS PAINÉIS DE FIBRAS VEGETAIS

A concepção de novos materiais surge da necessidade de melhorar as propriedades de um material pré-existente ou substituí-lo em uma aplicação. Identificada a necessidade de melhoria em um material, as propriedades a ela relacionadas devem ser equacionadas, no sentido de verificar a correspondência entre a alteração em um parâmetro do processo de fabricação e a alteração proporcionada a uma determinada propriedade deste material.

No caso da fabricação de painéis produzidos a partir de fibras vegetais utilizados para controle de ruído, sua concepção visa atender a necessidade por materiais que possuam baixo custo e apresentem bom desempenho. Já os parâmetros que podem ser alterados para que possam apresentar melhorias em suas propriedades, como capacidade de absorção sonora, por exemplo, abrangem desde a matéria-prima (fibras) utilizada para o processo de fabricação, até a quantidade de aglomerante utilizada.

3.1 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DOS PAINÉIS

A metodologia utilizada para o desenvolvimento dos painéis leva em consideração dois aspectos principais, os tratamentos (químicos, térmicos, etc.) que as fibras devem receber, quando necessário, para estarem aptas a se transformar em painéis e, a compatibilidade das fibras em relação ao aglomerante utilizado. Consideram-se também as propriedades desejadas no produto final no que diz respeito às suas características físicas, mecânicas, térmicas, acústicas, etc.

3.1.1 Tratamentos das fibras

Alguns tratamentos (químicos, térmicos, etc.) modificam a estrutura de determinadas fibras e, conseqüentemente, algumas de suas propriedades. Aumento do módulo de elasticidade, da resistência mecânica, diminuição da densidade, da massa, etc. são alguns dos resultados proporcionados por esses tratamentos, na maioria das vezes, utilizados para proporcionar melhores propriedades mecânicas. Propriedades mecânicas essas que, nas fibras vegetais, dependem de diversos fatores, tais como a natureza da fibra, volume, orientação, etc. A melhora das propriedades do produto final pode ser conseguida através da incorporação de

fibras tratadas superficialmente com agentes de acoplamento, a fim de aumentar a adesão interfacial entre as fibras.

3.1.1.1 *Tratamentos nas fibras de coco*

As fibras de coco, antes de serem utilizadas na forma de mantas, passam por um ciclo de processos industriais, no qual lhes são conferidas determinadas propriedades ao passarem por algumas etapas desse ciclo. Após o processo de extração, essas fibras passam pelas etapas descritas na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Ciclo do processamento industrial da fibra de coco utilizado pela empresa POEMATEC.

Desfibramento: Nesta etapa, denominada também de etapa de limpeza, são retirados os resquícios da casca do coco, poeira e impurezas em geral (ver Figura 3.2).



Figura 3.2 - Limpeza das fibras de coco.

Seleção: Na etapa de seleção, as maiores fibras são selecionadas e encaminhadas para a máquina responsável em transformá-las em cordas enquanto que as fibras menores são aproveitadas na fabricação de outros produtos (vasos, placas, estacas, etc.).

Encordoamento: O processo de encordoamento tem como principal objetivo facilitar a união entre as fibras, haja vista uma maior dificuldade em se unir fibras orientadas em um único sentido (ver Figura 3.3).

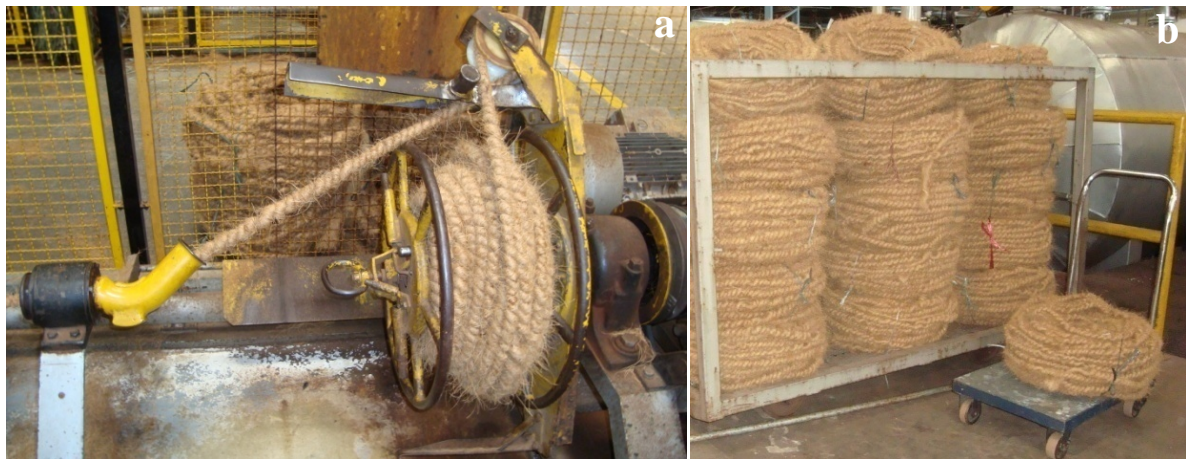


Figura 3.3 - (a) Máquina de encordoamento e (b) cordas de fibras à direita.

Cozimento: O cozimento proporciona um aumento considerável na elasticidade das fibras, tanto que chegam a permanecer por 15 dias na forma de cordas para manterem essa nova elasticidade. Este processo aumenta também a porosidade das fibras bem como sua densidade.

Desencordoamento: Durante o processo de desencordoamento, as cordas de fibras são trituradas e misturadas às fibras resultantes de aparas (rejeitos) provenientes de etapas posteriores.

Aplicação de látex: Uma formulação de látex é aplicada por agulhamento – processo no qual o produto a ser aplicado é pulverizado através de uma área pequena sob elevada pressão – sobre as camadas de fibra, promovendo uma melhor distribuição do aglomerante.

Prensagem: As fibras recebem diferentes prensagens neste processo (ver Figura 3.4a). As iniciais, de menor intensidade, promovem a moldagem das camadas de fibras anteriormente à aplicação do látex, enquanto que as finais, já com látex aplicado sobre as camadas de fibras, promovem a agregação final da manta e posteriormente são cortadas em dimensões pré-definidas (ver Figura 3.4b).



Figura 3.4 - (a) Máquina de mantas e (b) prensa de corte à direita.

Vulcanização: Nesta etapa, ar quente (a uma temperatura de cerca de 150 °C) é injetado ao mesmo tempo em que a manta está sendo prensada. Dessa forma, várias de suas propriedades são alteradas (volume, densidade, etc.), elevando de forma significativa sua rigidez e resistência a deformações (ver Figura 3.5).



Figura 3.5 - Autoclave de vulcanização.

Agente antichama: Na etapa final do ciclo, um agente antichama é pulverizado sobre as mantas com a finalidade de aumentar sua capacidade de resistir ao fogo (ver Figura 3.6).



Figura 3.6 - Aplicação de agente antichama.

As fibras de coco utilizadas neste trabalho foram obtidas junto à empresa POEMATEC, sendo certa quantidade *in natura* e certa quantidade obtida logo após passarem pelas 5 primeiras etapas do ciclo de processos industriais, anteriormente citado.

3.1.1.2 Tratamentos nas fibras de dendê

As fibras de dendê utilizadas foram adquiridas junto à Companhia Refinadora da Amazônia (CRA). Essas fibras foram separadas ao final do processo de extração de óleo e depois de passarem por secagem em forno microondas durante um período de cinco minutos, a quantidade de óleo residual nas amostras 1 e 2, respectivamente, após remoção por solvente (hexano) – processo que dura aproximadamente 6 horas – foi de 5,02% e 3,92% do peso total das amostras. Já com amostras separadas sob as mesmas condições, lavadas com detergente neutro diluído (na proporção de 1:20) e água corrente, repetindo-se esse processo duas vezes e, após as fibras serem secas em forno microondas e, em seguida, passarem pelo processo de remoção do óleo utilizando-se o mesmo solvente, a quantidade de óleo residual nas amostras 3 e 4 foi de 2,61% e 1,34%. Ou seja, após as lavagens com detergente, a quantidade de óleo nas fibras diminuiu consideravelmente, havendo a possibilidade de descartar a extração via solvente, uma vez que teores de óleo próximos de 1% tornam as fibras propícias para os fins desejados. Os ensaios anteriormente mencionados foram realizados no LabCQI - CRA (Laboratório de Controle de Qualidade Industrial – Companhia Refinadora da Amazônia), ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Instalações do LabCQI - CRA.

De posse desses resultados, ensaios semelhantes foram realizados no LAOS (Laboratório de Operações de Separação) o qual faz parte do Laboratório de Engenharia Química da UFPA (ver Figura 3.8), com o intuito de se determinar o número mínimo de lavagens nas fibras, de forma a possibilitar sua utilização na fabricação dos painéis sem que estes sofram alterações em curto prazo, nas suas propriedades mais relevantes, por conta de elevados teores de óleo.

Determinou-se através desses ensaios que três lavagens, utilizando a metodologia descrita anteriormente, são suficientes para que as fibras estejam aptas para a confecção dos painéis, já que com mais lavagens não ocorre nenhuma redução significativa na quantidade de óleo e demandam um tempo demasiadamente elevado, conforme os resultados apresentados a seguir (ver Tabela 3.1). Adotaram-se, portanto, três lavagens para que as fibras possam ser utilizadas nos processos de fabricação dos painéis.



Figura 3.8 - Instalações do LAOS.

Em ambos os laboratórios, os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela AOCS (*American Oil Chemists' Society*) no anexo Ba 3-38 (Éter de Petróleo).

Tabela 3.1 - Comparação entre o número de lavagens e a quantidade de óleo residual.

Amostra	Nº de lavagens	Óleo residual (%)	Tempo de operação estimado (400g) (min)
5	2	4,08	40
6	2	3,85	40
7	4	1,51	90
8	4	1,34	90
9	6	1,26	135
10	6	1,19	135

A quantidade residual de óleo nas fibras de dendê depende das condições do fruto antes do processamento e do processamento em si, condições estas que variam diariamente.

3.1.1.3 Tratamentos nas fibras de sisal

As fibras de sisal, por serem as de maior comprimento aqui trabalhadas e, principalmente, pela falta de referências quanto à questão de sua utilização na forma de painéis, foram cortadas em diferentes comprimentos, aleatoriamente selecionados, para se tentar obter o melhor tamanho de fibra, dentre os selecionados, para ser utilizado como referência na fabricação dos painéis e verificar de que forma a alteração desse parâmetro (comprimento) influencia nas características acústicas de um painel constituído por este material. Os comprimentos selecionados foram, aproximadamente, de 0,03 m (Fibra Pequena – FP), 0,07 m (Fibra Média – FM) e 0,1 m (Fibra Grande – FG) (ver Figura 3.9).

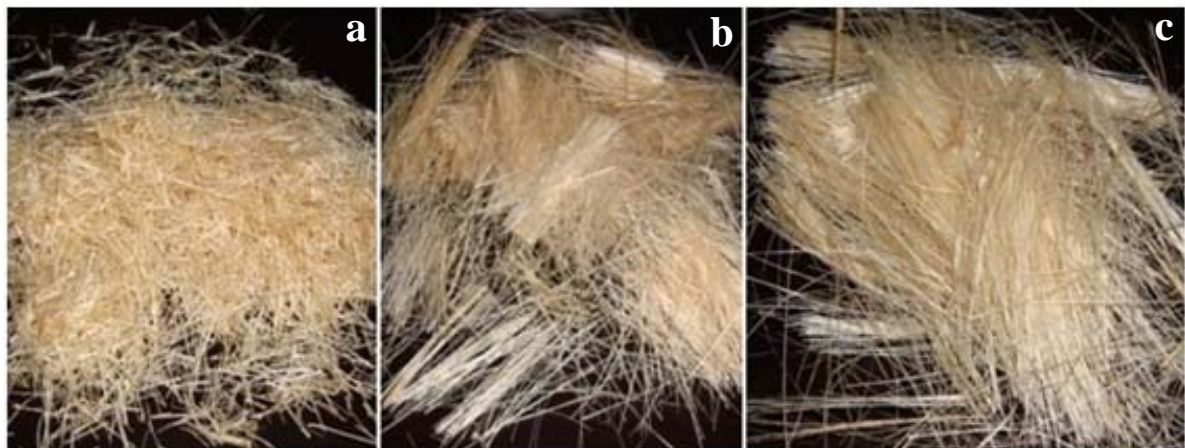


Figura 3.9 - Fibras de sisal cortadas em diferentes comprimentos: (a) 0,03 m, (b) 0,07 m e (c) 0,1 m.

As fibras de açaí não passaram por tratamentos específicos como as demais fibras, tendo sido submetidas à lavagem e secagem somente.

3.1.2 Classificação dos painéis

Os painéis receberam classificações de acordo com suas composições características em painéis multicamadas unifibra, multifibras e mesclados.

3.1.2.1 Painéis unifibra

São painéis constituídos por camadas de um único tipo fibra intercaladas por camadas de aglomerantes. Esses painéis, mostrados a seguir (ver Figura 3.10), foram desenvolvidos no intuito de conhecer as características de cada fibra separadamente, para que outros tipos de painéis (mesclados e multicamadas) pudessem ser feitos, combinando diferentes fibras, na tentativa de corrigir uma possível deficiência ou melhorar alguma propriedade na qual o painel unifibra não apresentasse desempenho satisfatório.

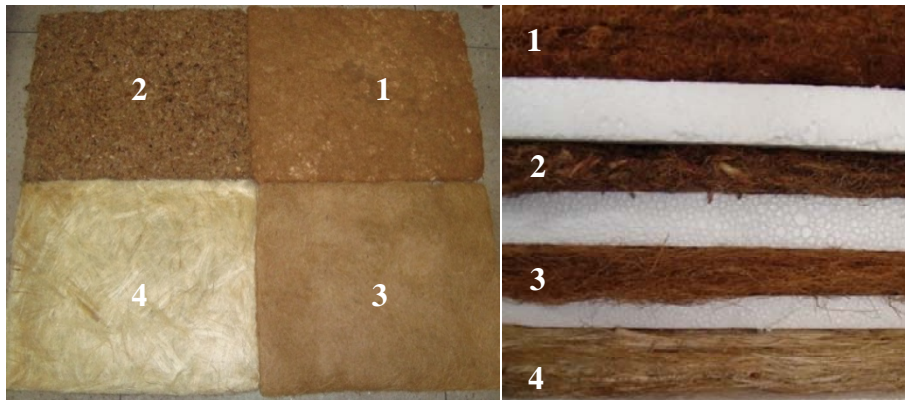


Figura 3.10 - Painéis multicamadas unifibra: de açai (1), de dendê (2), de coco (3) e de sisal (4).

3.1.2.2 Painéis multifibras

São painéis formados por camadas constituídas individualmente, por um único tipo de fibra, e intercaladas por camadas de aglomerantes, havendo, necessariamente, dois ou mais tipos de fibras na composição do painel (ver Figura 3.11).



Figura 3.11 - Painéis multifibras: coco/sisal.

3.1.2.3 Painéis mesclados

São painéis constituídos por misturas de dois ou mais tipos de fibras em cada camada, intercaladas por camadas de aglomerantes (ver Figura 3.12).



Figura 3.12 - Painéis mesclados: dendê/sisal.

3.1.3 Compatibilidade das fibras em relação aos aglomerantes utilizados

Foram testados aglomerantes dos mais variados tipos, sendo eles: cola branca de madeira à base de PVA, cola branca à base de acrilato e água, cola em spray e diferentes soluções de PVC com metil-etil-cetona. A seleção dos aglomerantes foi feita com base nas características fornecidas pelos fabricantes, com exceção das soluções de PVC que tiveram de ser preparadas, e com base nas características dos materiais a serem colados (neste caso, fibras). A aplicação dos aglomerantes foi feita com pistola de pintura com capacidade máxima de pressão de trabalho de 40 psi (275,79 kPa) e compressor rotativo do fabricante SCHULZ (ver Figura 3.13) com capacidade máxima de pressão de 600 psi (4136,85 kPa).



Figura 3.13 - Materiais utilizados para confeccionar os painéis, da esquerda para a direita: molde metálico, compressor rotativo e pistola de pintura.

É importante mencionar que, pelo fato das colas brancas, tanto a multiuso quanto a de madeira, possuem, segundo os fabricantes, viscosidades médias, diluições com água em diferentes proporções foram realizadas, uma vez que a pistola não era capaz de pulverizá-las na sua composição original.

Dessa forma, determinaram-se proporções de água/aglomerante, dentro da faixa de proporção estabelecida pelo fabricante (neste caso 1/10) que permitissem a aplicação do aglomerante por intermédio da pistola, além de apresentarem maior rendimento sem que sua aderência e tempo de secagem sofressem grandes alterações, haja vista que este último parâmetro depende fortemente de fatores como temperatura ambiente, porosidade dos materiais que estão sendo colados, quantidade do produto aplicado e proporções de cola e água na solução de aplicação. Todas as aplicações foram feitas utilizando-se máscara para vapores e óculos de proteção, ilustrados na Figura 3.14.



Figura 3.14 - Equipamentos de proteção utilizados durante a fabricação dos painéis.

3.1.3.1 Cola branca de madeira

Foram utilizadas colas de madeira convencionais, à base de PVA, dos fabricantes PULVITEC (tipo POLYFIX) e HENKEL (tipo CASCOREZ) em embalagens de 1 kg (ver Figura 3.15). Os resultados obtidos para este aglomerante foram satisfatórios para as fibras de sisal e coco, pois forneceram agregação razoável ao painel, enquanto que para as fibras de açaí e dendê não se obteve o mesmo bom desempenho tanto na aparência quanto na agregação final do painel. As vantagens desse tipo de aglomerante são: o baixo preço, facilidade de compra, não toxicidade, não é inflamável e é solúvel naturalmente em água. Por outro lado suas desvantagens são, principalmente, baixa aderência e reduzido tempo de vida.



Figura 3.15 - Colas brancas de madeira utilizadas e seus respectivos tipos e fabricantes.

3.1.3.2 Cola em spray

A cola em *spray* utilizada foi o adesivo industrial tipo Super 77 da fabricante 3M (ver Figura 3.16). Os resultados obtidos para este aglomerante foram satisfatórios para as fibras ensaiadas (sisal e coco), não havendo a oportunidade de testar esse material com as fibras de açaí e dendê. As vantagens desse aglomerante são a elevada aderência e curto tempo de secagem, enquanto que as desvantagens são o elevado custo de aquisição e a flamabilidade.



Figura 3.16 - Adesivo industrial tipo Super 77 da fabricante 3M.

3.1.3.3 Soluções de PVC

As soluções de PVC utilizadas foram soluções desenvolvidas e patenteadas pelo Grupo de Ecompositos da UFPA (ver Figura 3.17). Os resultados obtidos para a fibra testada (de coco) não foram satisfatórios, haja vista que os painéis fabricados com este aglomerante não apresentaram boa agregação final, além de apresentarem o cheiro característico do solvente utilizado durante um grande período de tempo. Um dos fatores que contribuíram para que este aglomerante não tivesse êxito foi o fato da fibra de coco utilizada ter outros produtos químicos associados a ela provenientes de etapas industriais prévias. As vantagens desse aglomerante são a redução dos rejeitos de PVC na natureza, obtida através da reutilização de tubos sanitários e, o tempo de vida elevado; já as desvantagens são a baixa

aderência na proporção utilizada, preparação complexa, forte cheiro característico e inflamabilidade do solvente.



Figura 3.17 - Instalações do Laboratório do Grupo de Ecomcompósitos.

3.1.3.4 Cola branca multiuso à base de acrilato e água

A cola multiuso utilizada foi o adesivo industrial *Fastbond* MR (49) à base de acrilato e água (ver Figura 3.18). Os resultados obtidos para este aglomerante foram muito satisfatórios uma vez que para todas as fibras testadas obteve-se, aparentemente, boa agregação dos painéis. As vantagens desse tipo de aglomerante são: elevada aderência, não é tóxico, não é inflamável e possui tempo de secagem curto; suas desvantagens são a formação de névoa quando da aplicação com pistola e custo elevado. Fazendo-se uma avaliação de todas as características desse aglomerante sob todos os aspectos relevantes, determinou-se que este seria o aglomerante a ser utilizado para a fabricação dos painéis uma vez que agregava os melhores requisitos.



Figura 3.18 - Adesivo industrial *Fastbond* MR (49).

Tendo-se como referência os processos industriais utilizados por empresas fabricantes de painéis de fibras vegetais utilizados para vários fins, desenvolveu-se um ciclo de processos

através do qual, os painéis de fibras, objetos de estudo do presente trabalho, foram desenvolvidos. O ciclo de processos é mostrado a seguir (ver figura 3.19).

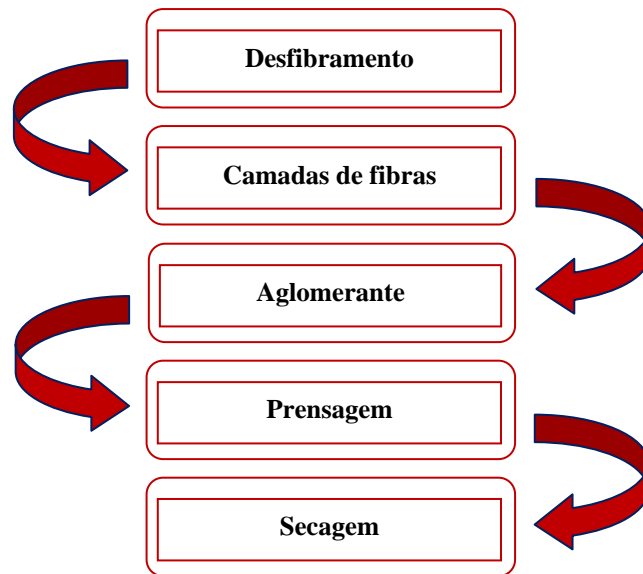


Figura 3.19 - Ciclo de processos utilizados para desenvolver os painéis de fibras vegetais propostos.

3.1.4 - Desenvolvimento dos painéis

O procedimento padrão para a fabricação dos painéis consiste em espalhar 250 g de fibra, quantidade que corresponde a uma camada do painel, camada a camada de fibra, intercalando-as com camadas de aglomerante. Após a sobreposição de uma nova camada de fibra é aplicada uma pressão de prensagem por meio de uma prensa hidráulica de, aproximadamente, 40 kgf/cm² (3922,66 kPa) durante um período de 15 minutos para acomodar as fibras, enquanto que a prensagem final, utilizada para promover a agregação final dos painéis, já com as 4 camadas de fibra sobrepostas, é de, aproximadamente, 70 kgf/cm² (6864,55 kPa) durante 45 minutos. O processo detalhado pode ser visto no APÊNDICE B – PROCESSO DE PRODUÇÃO ARTESANAL E PAINÉIS DE FIBRAS VEGETAIS UTILIZADOS PARA CONTROLE DE RUÍDO – deste trabalho.

Desfibramento: Nesta etapa inicial procura-se minimizar a quantidade de resquícios da casca do coco, existentes nas fibras de coco, de caroços de açaí nas fibras de açaí, de amêndoas de dendê nas fibras de dendê e impurezas em geral nas fibras de sisal, pois dificultam a adesão entre as camadas de fibras (ver Figura 3.20).



Figura 3.20 - Fibras *in natura* e suas impurezas.

Camadas de fibras: As camadas de fibras são formadas nesta etapa com a finalidade de agregá-las ao final do processo de prensagem (ver Figura 3.21).



Figura 3.21 - Camadas de fibras.

Aplicação de aglomerante: O aglomerante é aplicado sobre as camadas de fibras até que estas fiquem cobertas pelo material e apresentem certa adesão inicial para que o painel possa ser montado pela sobreposição dessas camadas (ver Figura 3.22). A quantidade de aglomerante utilizada varia sensivelmente dependendo do comprimento da fibra. Fibras menores possuem menor área de contato, sendo necessária uma quantidade maior de aglomerante para agregá-las.



Figura 3.22 - Aplicação de aglomerante sobre as camadas de fibras.

Prensagem: As fibras recebem diferentes prensagens neste processo (ver Figura 3.23). As iniciais, de menor tempo e intensidade, promovem a formação das camadas de fibras anteriormente à aplicação do aglomerante, enquanto que as finais, já com o aglomerante aplicado sobre as camadas, promovem a agregação final do painel.



Figura 3.23 - (a) e (b) Camadas de fibras sendo prensadas.

Secagem: A secagem é feita expondo os painéis a sol e vento. Um dia sob estas condições é suficiente para que os painéis estejam adequadamente secos (ver Figura 3.24).



Figuras 3.24 - Painéis durante a secagem.

O Desenvolvimento dos primeiros painéis serviu, principalmente, para determinar a maneira mais prática de produzi-los e os parâmetros mais relevantes, utilizados posteriormente como referência para se obter uma determinada padronização na fabricação dos mesmos, tais como, a quantidade de fibra por painel, a quantidade de fibra por camada, quantidade de aglomerante utilizado, tempo de prensagem e, principalmente, pressão de prensagem, fatores que, potencialmente, influenciam não só nas propriedades físicas e mecânicas, mas também em suas propriedades acústicas (CASTAGNÈDE et al., 2000).

Não foram utilizados processos de modificação estrutural nas fibras visando melhorias em suas propriedades ou facilidade em sua agregação, pois, atualmente, não existem normas ou procedimentos padrão para a realização de tratamentos superficiais em fibras vegetais, ficando a critério do usuário, estabelecer os próprios métodos de acordo com os resultados que se pretende obter, o que demanda grande tempo de pesquisa, sendo necessário adequar os processos de modificação já utilizados a cada situação (BISMARCK, et. al., 2001).

Embora o processo desenvolvido para elaboração dos painéis tenha sido bem sucedido e os mesmos tenham apresentado, aparentemente, boa agregação e bom aspecto visual, até que estes sejam utilizados para a finalidade de controle de ruído, é necessário que passem por ensaios experimentais e por um processo de caracterização acústica, para que fique comprovado, cientificamente, que estão aptos ao uso e que apresentam bom desempenho acústico.

CAPÍTULO 4

ENSAIOS EXPERIMENTAIS E CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA

4.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Para que determinados materiais sejam utilizados para a finalidade de controle de ruído, é necessário que estes apresentem bom desempenho em outros aspectos, além do acústico, para que não representem uma fonte de riscos desnecessária não só ao estabelecimento em que estiverem sendo utilizados, mas, principalmente, às pessoas que vierem a frequentá-lo. Por exemplo, fibras vegetais são inflamáveis por natureza. Assim, é de fundamental importância que estas resistam ao fogo quando forem utilizadas como painéis para controle de ruído ou em associação com outros dispositivos acústicos como no caso de silenciadores resistivos, portas acústicas, etc. Em outros materiais o surgimento de fungos ocorre rapidamente ou então exalam fortes odores, degradam facilmente, entre outros.

O desempenho dos materiais em questão é feito através de ensaios experimentais, como os ensaios de flamabilidade e envelhecimento, por exemplo, que avaliam, respectivamente, o comportamento de um material em contato com o fogo e o comportamento deste às condições mais severas para sua degradação (exposição ao calor e à umidade). O objetivo dos ensaios experimentais é determinar o comportamento dos materiais em análise quando submetidos a situações semelhantes às que eventualmente poderão ser expostos.

Os ensaios a serem realizados nos painéis em estudo são os ensaios de: flamabilidade, envelhecimento (comportamento ao calor), odor e fungamento, pois como se trata de painéis de fibras e, portanto, materiais orgânicos, é preciso investigar aspectos que não são abordados quando são realizados ensaios com outros tipos de materiais utilizados para finalidade anteriormente citada. Alguns materiais sintéticos não são analisados quanto ao surgimento de fungos, por exemplo. Adicionalmente, os referidos ensaios já são realizados pela maioria das empresas fabricantes de painéis de fibras vegetais e, se contemplados em todos, estarão apto ao uso. Todos os ensaios experimentais mencionados anteriormente foram realizados no Laboratório Industrial da empresa POEMATEC por seus funcionários qualificados.

4.1.1 Preparação dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova (ver Figura 4.1) foi feita segundo padrões de dimensões pré-determinados, sugeridos de acordo com as normas que estabelecem a metodologia dos ensaios a serem realizados. É importante salientar que os corpos de prova utilizados foram obtidos de seus respectivos painéis de fibras, minimizando assim possíveis diferenças nos resultados dos ensaios, devido a variações nas condições de processamento a que produtos fabricados manualmente ficam submetidos. Para cada ensaio, um corpo de prova específico era preparado, não havendo assim, corpos de prova semelhantes para ensaios diferentes.

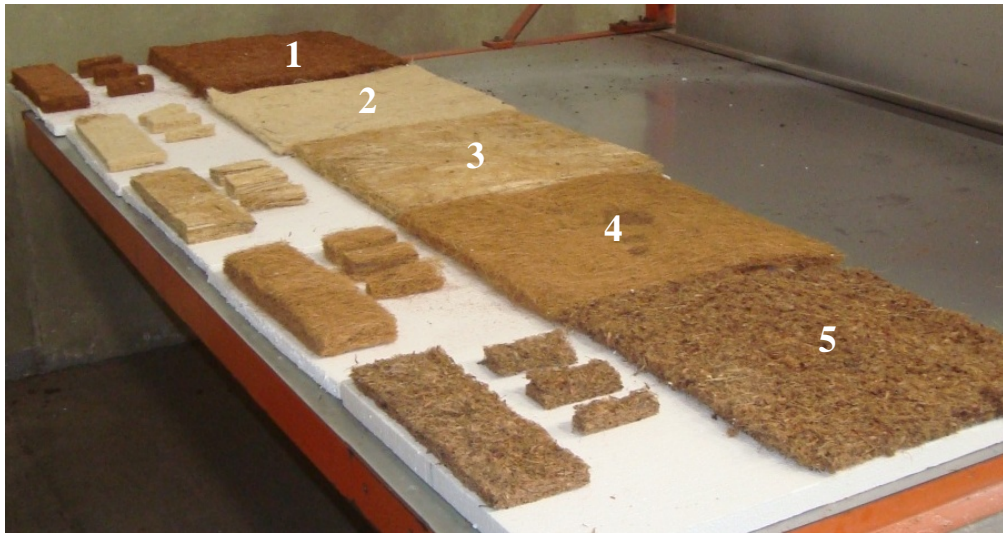


Figura 4.1 - Corpos de prova: painéis artesanais (1) de açai, (2) de sisal tipo fibras pequenas - FP, (3) de sisal tipo fibras grandes - FG, (4) de coco e (5) de dendê.

4.1.2 Flamabilidade

O objetivo deste ensaio é quantificar a velocidade horizontal com que o material se degrada através da ação do fogo, ou seja, quantificar sua velocidade horizontal de queima.

4.1.2.1 Materiais utilizados para a realização do ensaio de flamabilidade

- Câmara de combustão;
- Bico de Bunsen;
- Cronômetro;
- Capela de exaustão;
- Amostras de painéis de fibras vegetais;
- Régua.

Neste ensaio os corpos de prova são colocados no interior de uma capela (ver figura 4.2a), a qual dispõe de uma câmara específica para combustão (ver Figura 4.2b), sendo posicionados ao longo dessa câmara e a 20 mm da extremidade superior do bico de Bunsen. A chama é então regulada para a altura de 40 mm, aproximadamente, e dá-se início ao ensaio. Durante 15 s a chama fica em contato com a amostra; após esse tempo de contato, extingue-se a chama e inicia-se a quantificação da velocidade de queima da amostra. Caso a chama percorra até 100 mm em 1 minuto, a amostra estará aprovada quanto à sua flamabilidade, caso contrário, ou seja, acima de 100 mm, a amostra estará reprovada.

Estes ensaios foram realizados baseando-se nas normas DIN 75200 - *Determination of burning behavior of interior materials in motor vehicles*; FMVSS 302 - *Flammability of Interior Materials* e ISO 3795/1976 - *Road vehicles - Determination of burning behavior of interior materials for motor vehicles*.



Figura 4.2 - (a) Capela utilizada para o ensaio de flamabilidade e (b) câmara de combustão.

Os resultados obtidos para as amostras ensaiadas quanto à flamabilidade são apresentados na Tabela 4.1, a seguir. No geral, as amostras apresentaram boa resistência a chamas. Uma importante característica que contribuiu para este desempenho foi o fato dos painéis estarem bem compactados, havendo, aparentemente, poucos espaços vazios em suas estruturas, o que dificulta a propagação de chamas.

Tabela 4.1 - Resultados e avaliação das amostras ensaiadas quanto à flamabilidade.

AMOSTRA	RESULTADO	CONDIÇÃO DA AMOSTRA
SISAL FP 1	40 mm/min	APROVADA
SISAL FP 2	40 mm/min	APROVADA
AÇAÍ 1	45 mm/min	APROVADA
AÇAÍ 2	30 mm/min	APROVADA
COCO 1	60 mm/min	APROVADA
COCO 2	Percorreu toda a amostra	REPROVADA
DENDÊ 1	40 mm/min	APROVADA
DENDÊ 2	70 mm/min	APROVADA
SISAL FG 1	20 mm/min	APROVADA
SISAL FG 2	15 mm/min	APROVADA

Em relação à reprovação da amostra COCO 2, é importante mencionar que pelo fato de haver fibras soltas na amostra em questão, devido à insuficiência de aglomerante, o fogo percorreu-a justamente nessas fibras soltas, deixando intacto o painel em si. Outro fato relevante foi o de que a chama extinguiu-se por si só em todas as amostras, atribuindo-se este feito ao aglomerante utilizado.

4.1.3 Odor

Neste ensaio verifica-se o comportamento olfativo do material sob a influência de temperatura e clima diversos.

4.1.3.1 Materiais utilizados para a realização do ensaio de odor

- Potes de conserva de 1 litro;
- Papel de filtro;
- Água destilada;
- Amostras de painéis de fibras vegetais;
- Estufa.

As amostras dos painéis são armazenadas nos potes de conserva de 1 litro (ver Figura 4.3). As tampas são forradas com o papel de filtro para evitar o escapamento de ar. Os potes são posicionados com a tampa para baixo antes do início do ensaio. As amostras a serem armazenadas em estado úmido são molhadas com 5 ml de água destilada. Em seguida ficam submetidas às seguintes condições:

- a) 24 h à temperatura ambiente em estado seco;

- b) 24 h à temperatura ambiente em estado úmido;
- c) 24 h a 70 °C em estado seco;
- d) 24 h a 70 °C em estado úmido.



Figura 4.3 - Amostras de painéis de fibras vegetais prontas para o ensaio de odor.

A avaliação de odor é feita por três pessoas aptas para esta análise, que atribuem a cada amostra, notas de 0 a 3, sendo 0 – Praticamente inodoro; 1 – Leve odor próprio, livre de odor adicional; 2 – Odores perceptíveis ou incômodos; 3 – Odores intensivos ou desagradáveis. Dessa forma, duas notas iguais determinam a nota média. No caso de todas as notas serem diferentes, uma quarta pessoa determina a nota média da amostra, dentre aquelas previamente fornecidas. Os resultados obtidos para as amostras ensaiadas são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados e avaliação das amostras ensaiadas quanto ao odor.

AMOSTRA	RESULTADO	CONDIÇÃO DA AMOSTRA
SISAL FP 1	0	APROVADA
SISAL FP 2	1	APROVADA
AÇAÍ 1	1	APROVADA
AÇAÍ 2	1	APROVADA
COCO 1	1	APROVADA
COCO 2	0	APROVADA
DENDÊ 1	3	REPROVADA
DENDÊ 2	3	REPROVADA
SISAL FG 1	0	APROVADA
SISAL FG 2	1	APROVADA

A reprovação das amostras DENDÊ 1 e DENDÊ 2 quanto ao odor, se deve, principalmente, ao fato dessas amostras conterem, ainda que pequeno, certo teor de óleo residual, podendo-se afirmar que o painel constituído por este tipo de fibra é mais sensível ao

calor e à umidade que os demais, uma vez que no estado seco não exala odores intensos. Os corpos de prova foram climatizados conforme DIN 53579 - *Testing of flexible cellular materials - Indentation test on finished parts* e ensaiados de acordo com a norma brasileira ABNT – Banco veicular em fibra de coco, 1996.

4.1.4 Envelhecimento (Comportamento ao calor)

Neste ensaio, o comportamento ao calor das amostras de fibra (ver Figura 4.4a) é avaliado submetendo-as à temperatura de 70 ± 2 °C durante 48 horas em estufa com ar circulante (ver Figura 4.4b) e em seguida por um período de 30 minutos à temperatura de 23 ± 2 °C, verificando-se, ao final, se as amostras apresentam algum indício de fragilização. Ensaio realizado conforme ABNT – Banco veicular em fibra de coco, 1996.

4.1.4.1 Materiais utilizados para a realização do ensaio de envelhecimento

- Estufa com ar circulante;
- Amostras de painéis de fibras vegetais.

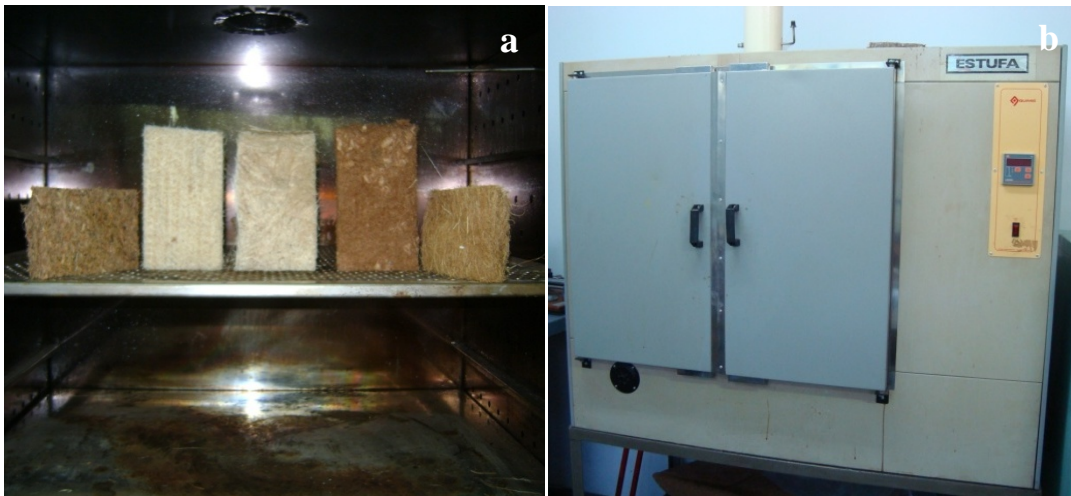


Figura 4.4 - (a) Amostras ensaiadas e (b) estufa com ar circulante.

Os resultados obtidos através dos ensaios de envelhecimento são apresentados na Tabela 4.3. De um modo geral, todas as amostras apresentaram bons resultados, sendo importante ressaltar o fato de o aglomerante ter contribuído para este bom desempenho, uma vez que é sintético e assim, aumenta a resistência à umidade e ao calor dos painéis e, conseqüentemente, seu tempo de vida. Suas características iniciais permaneceram inalteradas depois de serem expostos a condições ambientais adversas. Com relação à amostra DENDÊ, esta já apresentava uma leve pega antes da realização do ensaio proveniente do aglomerante utilizado para sua fabricação.

Tabela 4.3 - Resultados e avaliação das amostras ensaiadas quanto ao envelhecimento.

AMOSTRA	RESULTADO	CONDIÇÃO DA AMOSTRA
SISAL FP	A peça manteve suas características iniciais sem fragilização, quebra ou destruição da peça.	APROVADA
AÇAÍ	A peça manteve suas características iniciais sem fragilização, quebra ou destruição da peça.	APROVADA
COCO	A peça manteve suas características iniciais sem fragilização, quebra ou destruição da peça.	APROVADA
DENDÊ	A peça manteve suas características iniciais sem fragilização, quebra ou destruição da peça, apresentando somente uma leve pega.	APROVADA
SISAL FG	A peça manteve suas características iniciais sem fragilização, quebra ou destruição da peça.	APROVADA

4.1.5 Suscetibilidade a fungos (Fungamento)

O teste de fungamento tem como objetivo, detectar o aparecimento de fungos, bactérias ou qualquer organismo nocivo à saúde humana em determinadas condições ambientais. No que diz respeito a fatores microbiológicos, a preocupação com contaminantes do ar, como, por exemplo, fungos de dispersão aérea (anemófilos), é de fundamental importância. Fungos anemófilos são os principais contaminantes do ar em ambientes fechados, podendo promover a sensibilização de indivíduos suscetíveis, desencadeando processos alérgicos, irritação em mucosas e pele, além de infecções fúngicas.

O processo de detecção de fungos consiste em induzir a formação de fungos em cada amostra através de um cultivo em placa, expondo-as a determinadas condições climáticas. Dessa forma, as partículas se depositam no meio do cultivo e as colônias de fungos podem ser identificadas.

Os resultados obtidos para a detecção de fungos foram satisfatórios para todas as amostras e novamente o aglomerante teve papel fundamental, pois é altamente resistente a fungos, o que acaba potencializando a resistência a fungos dos painéis de fibras como um todo. A Tabela 4.4 apresenta os resultados deste ensaio.

Tabela 4.4 - Resultados e avaliação das amostras ensaiadas quanto à suscetibilidade a fungos.

AMOSTRAS	RESULTADO	CONDIÇÃO DA AMOSTRA
SISAL FP	Não apresentaram bactérias ou leveduras e as quantidades de fungos foram menores que 80 colônias/ml.	APROVADA
AÇAÍ	Não apresentaram bactérias ou leveduras e as quantidades de fungos foram menores que 80 colônias / ml.	APROVADA
COCO	Não apresentaram bactérias ou leveduras e as quantidades de fungos foram menores que 80 colônias / ml.	APROVADA
DENDÊ	Não apresentaram bactérias ou leveduras e as quantidades de fungos foram menores que 80 colônias / ml.	APROVADA
SISAL FG	Não apresentaram bactérias ou leveduras e as quantidades de fungos foram menores que 80 colônias / ml.	APROVADA

4.1.6 Densidade, gramatura e espessura dos painéis

Os valores aproximados de densidade, gramatura e espessura dos painéis são apresentados a seguir (ver Tabela 4.5). Os painéis passam por um processo de pesagem (ver Figura 4.5), determinando-se assim a massa de cada um deles. Suas dimensões (espessura, comprimento e largura) já são conhecidas e dessa forma, são determinados seus volumes e áreas superficiais. Dividindo-se suas massas por seus respectivos volumes, são obtidas suas densidades e, fracionando-se por suas respectivas áreas superficiais, são obtidas suas gramaturas.

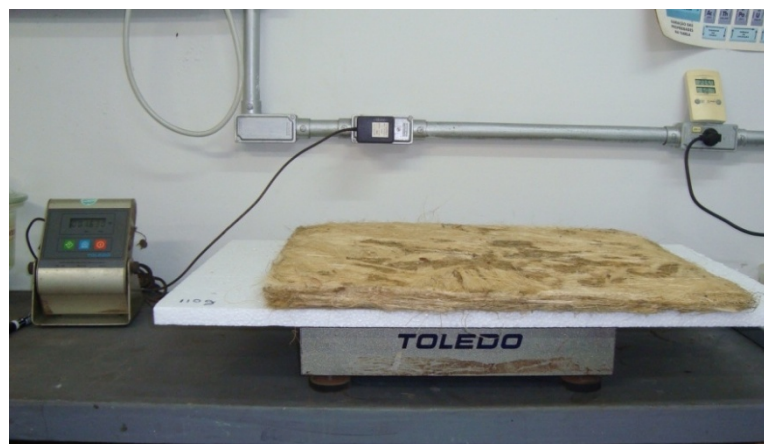


Figura 4.5 - Pesagem dos painéis.

Tabela 4.5 - Densidade, gramatura e espessura dos painéis.

PAINÉIS	DENSIDADE (kg/m³)	GRAMATURA (g/m²)	ESPESSURA (mm)
SISAL FP	17	3367	20
AÇAÍ	11	3283	30
COCO	16	3328	28
DENDÊ	18	3557	25
SISAL FG	21	5434	33

De acordo com a Tabela 4.5, os painéis confeccionados são de baixas densidade e espessura, o que os torna mais fáceis para o manuseio e instalação, sem que ocupem muito espaço quando de sua utilização. Por exemplo, a utilização de um material absorvente, de 100 mm de espessura, como revestimento interno em um ambiente, não revestindo somente o piso, reduz, aproximadamente, em 8 % o volume desse ambiente. Ou seja, reduz-se consideravelmente o volume de um ambiente que nem sempre pode sofrer esta perda.

Algumas propriedades, também de grande importância, não foram abordadas aqui, ou pela falta de instalações adequadas para serem determinadas ou pela falta de normas específicas para a execução de ensaios em painéis de fibras. A condutividade térmica, por exemplo, é uma propriedade muito importante, pois se conhecendo as características térmicas de um material, essas podem servir como um critério de seleção quando dois materiais apresentarem desempenho semelhante em outros aspectos.

Um material acústico deve possuir baixa condutividade térmica, agindo mais como um isolante, e para isso, deve possuir as seguintes características (TORREIRA, 1980): baixa condutividade térmica, boa resistência mecânica, baixa massa específica, baixa difusividade térmica – indica como o calor se difunde através de um material; elevado calor específico, boa resistência a chamas, baixo coeficiente de expansão térmica, estabilidades química e física, resistência específica ao ambiente de utilização, facilidade de aplicação, resistência ao ataque de roedores, insetos e fungos, higroscopicidade baixa – propriedade que certos materiais possuem em absorver água do ambiente; ausência de odor e baixo custo.

Na prática, é impossível dispor de um material que possua todas as características descritas anteriormente; sugere-se então, optar pelo que satisfaça ao maior número de características. Os painéis de fibras vegetais fabricados neste trabalho são resistentes a ataques de roedores, insetos e fungos; possuem baixa massa específica; apresentam boa resistência a chamas; são estáveis química e fisicamente; são de fácil aplicação; são praticamente inodoros e são de baixo custo; adicionalmente, ainda que não tenham sido realizados ensaios para

determinar a condutividade térmica dos referidos painéis, fibras vegetais apresentam características que viabilizam tecnicamente seu uso como isolante térmico (NEIRA, 2005). Em outras palavras, contemplam a maioria das características exigidas para serem considerados bons isolantes térmicos.

Pelo fato do trabalho possuir como um dos objetivos a fabricação de painéis de forma artesanal e uma vez que o maquinário para fabricação destes ainda não foi completamente desenvolvido, pode-se afirmar que, como os painéis apresentaram características satisfatórias em vários aspectos através desse processo, é de se esperar que quando este processo seja otimizado e automatizado essas características sejam melhoradas.

A avaliação geral que se faz, em relação aos painéis, após a execução dos ensaios experimentais, é que todos apresentaram resultados satisfatórios, compatíveis com materiais comercialmente disponíveis, atestando que esses materiais não comprometem o ambiente nem as pessoas que eventualmente vierem a frequentá-lo.

4.2 CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA

A caracterização acústica de um material é feita no intuito de verificar se sua utilização é viável quanto à eficiência, ou seja, define-se quão acusticamente absorvente ou isolante o material é.

Perda de Transmissão e Coeficiente de Absorção Sonora são as propriedades que melhor avaliam o desempenho acústico de um material. A Absorção Sonora trata do fenômeno que minimiza a reflexão das ondas sonoras em um determinado ambiente, ou seja, diminui ou elimina o nível de reverberação desse ambiente. Nestes casos, se deseja, além de diminuir os níveis de pressão sonora do recinto, melhorar o nível de inteligibilidade. Os materiais utilizados para corrigir o nível de reverberação de ambientes são relativamente leves (de baixa densidade), fibrosos ou porosos, como, por exemplo, espumas poliéster de células abertas, fibras cerâmicas, lã de vidro ou de rocha, tecidos, carpetes, etc. Nos materiais fibrosos, a absorção se dá essencialmente pela dissipação de energia sonora por atrito, gerado pelo movimento das moléculas do ar no interior do material, quando a onda sonora incide sobre o mesmo; já nos materiais porosos, a energia acústica incidente entra pelos poros e dissipa-se por reflexões múltiplas e atrito viscoso, transformando-o em energia térmica. A absorção sonora de um material, dada em metro quadrado (ISO 354/1999), pode ser calculada a partir da Eq. (4.1):

$$A_a = \frac{55,3V}{c} \left(\frac{1}{\bar{t}_2} - \frac{1}{\bar{t}_1} \right) \quad (4.1)$$

em que \bar{t}_2 é o tempo de reverberação médio da câmara com amostra em seu interior, expresso em segundos; \bar{t}_1 o tempo de reverberação médio da câmara sem amostra em seu interior, também expresso em segundos; V o volume da câmara reverberante, expresso em metros cúbicos; e c a velocidade do som no meio, expressa em metros por segundo, determinada pela Eq. (4.2).

$$c = 331 + 0,6T \quad (4.2)$$

em que T é a temperatura do meio, expressa em graus Celsius.

O coeficiente de absorção sonora (α), parâmetro adimensional, é obtido utilizando-se a Eq. (4.3) na qual a absorção do material é fracionada pela área da amostra.

$$\alpha = \frac{A_a}{S} \quad (4.3)$$

em que S é a área superficial da amostra.

A Perda de Transmissão estabelece a quantidade de energia perdida quando da transmissão do som de um meio para outro, separados por um obstáculo (parede, divisória, etc.), ou seja, está relacionada à capacidade que um determinado material possui em dificultar a transmissão sonora através dele próprio. Neste caso, deseja-se impedir ou, pelo menos, minimizar a um nível aceitável, o ruído ao qual o homem fica exposto. Normalmente são utilizados materiais de alta densidade superficial como, por exemplo, concreto, vidro, chumbo, etc. para isolar acusticamente os ambientes. O isolamento acústico proporcionado por paredes, pisos, divisórias ou partições, tem como objetivo atenuar a transmissão de energia sonora de um ambiente para outro. Dessa forma, sua eficiência é fortemente dependente da frequência do som incidente.

A Perda de Transmissão pode ser, experimentalmente, calculada pela Eq. (4.4):

$$PT = (\overline{NPS}_1) - (\overline{NPS}_2) + 10 \cdot \log \left(\frac{S_{DIV}}{A_2} \right) \quad (4.4)$$

Em que:

\overline{NPS}_1 → Nível de Pressão Sonora Médio na Câmara Emissora;

\overline{NPS}_2 → Nível de Pressão Sonora Médio na Câmara Receptora;

$$\overline{\text{NPS}}_{1,2} = 10 \cdot \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\text{NPS}_i}{10}} \quad (4.5)$$

S_{DIV} → Área superficial da divisória ou barreira que separa as duas câmaras germinadas;

A_2 → Absorção total da Câmara Receptora (constante de Sabine), definida como:

$$A_2 = \frac{0,161 \cdot V}{t_2} \quad (4.6)$$

Sendo t_2 o tempo de reverberação da câmara de recepção e V seu volume.

4.2.1 Coeficiente de Absorção Sonora dos painéis

Como neste trabalho o objeto de estudo são painéis de fibras vegetais, não é relevante analisá-los quanto à Perda de Transmissão, uma vez que são leves, flexíveis, e possuem vários espaços vazios (interstícios) em sua estrutura, limitações que não os torna bons isolantes acústicos. Por outro lado, essas mesmas características fazem com que certa quantidade de energia, emitida por uma fonte sonora, ao incidir sobre um dos painéis (elemento absorvedor), seja refletida com uma intensidade de energia reduzida. O restante da energia é transformado pelo elemento em energia térmica, ou calor. A energia sonora se dissipa em calor por causa das perdas de escoamento viscoso dentro do material e também pelas perdas por atrito interno do movimento das fibras (GERGES, 2000). Por este motivo, a caracterização acústica a ser feita no objeto de estudo deste trabalho se limitará à Absorção Sonora e, conseqüentemente, ao Coeficiente de Absorção Sonora.

4.2.1.1 Materiais utilizados para a realização da caracterização acústica dos painéis

- *Software* LabShopView versão 12.5.0;
- Minicâmara reverberante;
- Câmara reverberante em escala real;
- Analisador de sinais (PULSE) B&K 3560C ;
- Medidor de nível sonoro 01dB - Metravib, Blue Solo 01, número de série 60266;
- Microfone GRAS, MCE 212, número de série 75246 e microfone B&K, tipo 4942 - A - 021 (nº de série: **2330293**) para campo difuso;
- Fonte sonora B&K, tipo 4224, número de série 1491240 e alto-falante *Selenium* modelo MD BASS 6MB1, de 15” de diâmetro;
- Termohigrômetro digital;

- Amplificador;
- Microcomputador (*Notebook*);
- Suportes para microfones;
- Cabos de conexão (BNC, RJ45, Speakon, etc.);
- Extensões elétricas;
- Painéis de fibras vegetais;
- Dispositivos de acrílico;
- Calibrador sonoro B&K 4231, número **de série 50241880**.

A câmara reverberante utilizada na maioria dos ensaios foi uma câmara reduzida (ver Figura 4.6). Os princípios válidos em câmaras reverberantes reais se aplicam às câmaras reduzidas (Princípio da Reciprocidade, do Campo Difuso, etc.) e a mesma é qualificada para os ensaios a que foi destinada. Os ensaios realizados na minicâmara em questão tinham como objetivo determinar o coeficiente de absorção sonora das amostras utilizando-se o Método de Interrupção do Ruído, o qual consiste na obtenção de curvas de decaimento através do registro direto do decaimento do nível de pressão sonora após a câmara ter sido excitada com ruído de banda larga.



Figura 4.6 - Interior da minicâmara: seus difusores, fonte sonora e suporte do microfone.

A fonte sonora instalada no interior da minicâmara, como pode ser visto na Figura 4.6 é fixa, tentando-se compensar essa limitação com o aumento do número de medições, 10 pontos, sendo 3 medições para cada ponto, totalizando 30 medições, número suficiente de

medições, uma vez que a norma ISO 354/1999 estabelece que o número mínimo de medições necessárias para cada banda de frequências é:

- Doze decaimentos de 100 Hz a 250 Hz (por exemplo, dois para cada uma de seis combinações de fonte/microfone);
- Nove decaimentos de 315 Hz a 800 Hz (por exemplo, três para cada uma de três combinações de fonte/microfone);
- Seis decaimentos de 1000 Hz a 5000 Hz (por exemplo, dois para cada uma de três combinações de fonte/microfone).

O microfone utilizado durante as medições foi um microfone B&K, tipo 4942 - A - 021 (**nº de série: 2330293 (Campo Difuso)**), o qual fazia parte de uma cadeia de medição que foi concebida, utilizando os elementos que são, normalmente, utilizados nestes tipos de ensaio: transdutor, analisador, computador e amplificador. A Figura 4.7 mostra como ficou esquematizada essa cadeia para se fazer a aquisição de dados.



Figura 4.7 - Cadeia de medição (sistema de aquisição de dados).

Um analisador de sinais (PULSE) da fabricante B&K tipo 3560C, e um amplificador analógico também faziam parte do sistema de aquisição de dados. Montada a cadeia de medição, o passo seguinte é quantificar as grandezas do material em estudo, que se tem interesse. Antes das medições serem feitas, é impreterível que seja feita a calibração da instrumentação, a fim de certificar o correto funcionamento do conjunto de equipamentos. Utilizou-se o calibrador sonoro: B&K 4231 (**nº de série: 50241880 (2004)**).

As amostras devem entrar em equilíbrio com as condições de temperatura e umidade relativa do ar apresentadas pela câmara antes que se iniciem as medições. Os seguintes procedimentos também foram adotados: o microfone era inserido no interior da câmara

reverberante, sustentado por um suporte; em seguida a câmara era fechada, e assim dava-se início às medições. Procurou-se realizar os experimentos na mesma faixa de horário (entre 10:00 h e 16:00 h), para tentar ensaiar o material sob as mesmas condições em relação a fatores externos: nível de ruído de fundo, ruídos externos aleatórios, temperatura ambiente, etc. que, potencialmente, poderiam interferir nos resultados.

É importante mencionar que foi utilizado um intervalo de tempo suficientemente grande (cerca de 10 segundos) entre as medições, para que os valores das grandezas medidas fossem independentes, assim como o intervalo de tempo entre a análise de duas amostras distintas e consecutivas de modo que os processos fossem considerados independentes.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização Acústica de materiais (ver Figura 4.8) do Grupo de Vibrações e Acústica – GVA, da Universidade Federal do Pará – UFPA, utilizando-se a câmara reverberante reduzida existente no local, por ser a ferramenta disponível quando das medições para quantificação do coeficiente de absorção sonora, tendo sido desenvolvida como parte de uma dissertação de mestrado (GUEDES, 2007) do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM).



Figura 4.8 - Instalações do Laboratório de Acústica da UFPA.

Para que os resultados possam ter confiabilidade, uma série de exigências e procedimentos normalizados deve ser seguida. No caso da norma ISO - 354/1999, uma das exigências é que a diferença entre o Nível de Ruído de Fundo (NRF) e o Nível de Pressão Sonora (NPS) da fonte seja de pelo menos 15 dB em cada banda de um terço de oitava. A figura a seguir mostra que essa exigência foi respeitada (ver Figura 4.9).

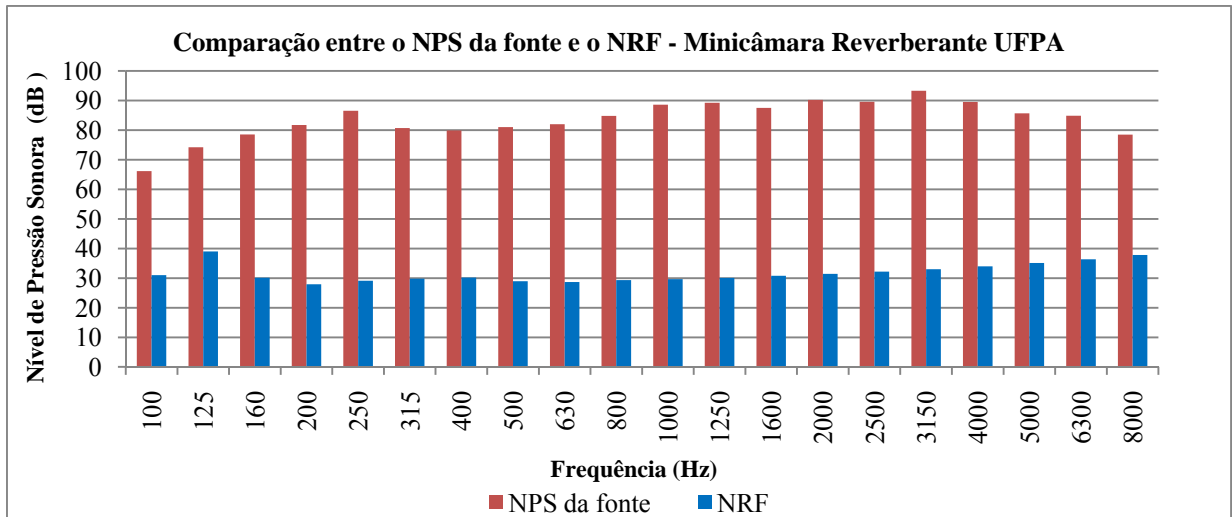


Figura 4.9 - Comparação entre o NPS devido à fonte no interior da minicâmara e o NRF em um dia típico.

Em relação à absorção sonora das superfícies da câmara, segundo a norma anteriormente citada, é recomendado que o gráfico dessa grandeza em função da frequência seja uma curva suave e não apresente picos ou vales divergindo mais do que 15% da média de dois valores adjacentes em bandas de um terço de oitava, para que não se tenha valores superestimados de absorção sonora dos materiais em estudo. Segundo outras referências (ARAÚJO, 2002) o coeficiente de absorção sonora das superfícies da câmara deve ser tão baixo quanto possível, não excedendo 3% do coeficiente de absorção sonora da amostra em estudo, em cada banda de frequência analisada. O gráfico mostrado na Figura 4.10 mostra os resultados obtidos para o coeficiente de absorção sonora das superfícies da câmara.

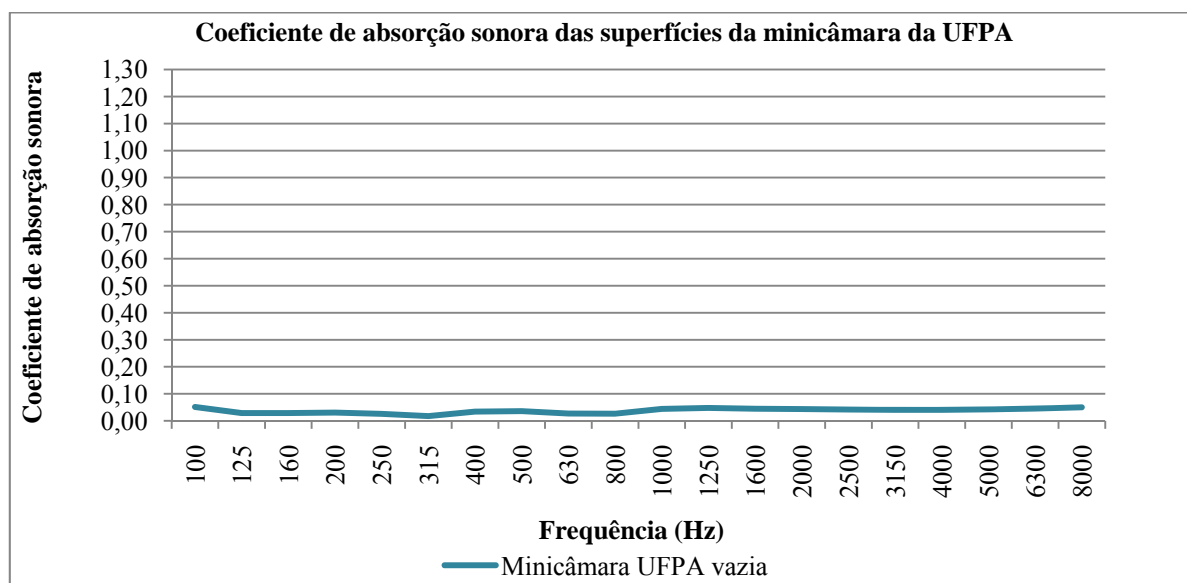


Figura 4.10 - Coeficiente de absorção sonora das superfícies da minicâmara reverberante da UFPA.

No caso da referida minicâmara, suas superfícies internas apresentaram baixos coeficientes de absorção sonora como pode ser visto na Figura 4.10, não apresentando grandes disparidades ao longo do espectro de frequência analisado, contemplando-se mais esta exigência.

Em relação à temperatura e umidade relativa do ambiente de ensaio, ainda utilizando-se como referência a norma supracitada, são estabelecidas determinadas condições climáticas a serem respeitadas (ver Tabela 4.6). Como em um ambiente laboratorial (ambiente fechado) as condições climáticas são melhor controladas, não ocorreram grandes variações de temperatura e umidade relativa, sendo que, para a primeira, a variação máxima não chegou a 2 °C, enquanto que, para a segunda, a variação máxima foi de 3,5 %, baseando-se nas condições de um dia típico.

Tabela 4.6 - Condições de temperatura e umidade relativa do ar, durante as medições de tempo de reverberação, a serem respeitadas.

Umidade relativa (U.R.)	Varição máxima da umidade relativa durante as medições	Varição máxima da temperatura durante as medições	Limite inferior da temperatura
40% < U.R < 60%	3%	3 °C	10 °C
U.R > 60%	5%	5 °C	10 °C

Caso as condições acima mostradas não fossem respeitadas, fórmulas de correção seriam aplicadas para que os dados pudessem ter confiabilidade. O instrumento utilizado para se fazer as medições de temperatura e umidade relativa é mostrado na Figura 4.11.



Figura 4.11 - Termo-higrômetro digital durante medição de temperatura e umidade relativa em um dia típico.

Com as condições do ambiente de ensaio e as características da câmara estando em conformidade com as exigências impostas pela norma ISO 354/1999, os coeficientes de

absorção sonora, obtidos através do processo de caracterização acústica dos painéis analisados, serão apresentados a seguir.

Observando-se o gráfico da Figura 4.12, a seguir, é possível notar que os comprimentos das fibras de sisal utilizados neste trabalho, não interferiram de forma significativa no coeficiente de absorção sonora dos seus respectivos painéis, pois seus coeficientes de absorção sonora apresentaram praticamente a mesma tendência. O desempenho destes painéis foi muito satisfatório, pois a partir de 1250 Hz o menor valor obtido para seus coeficientes de absorção sonora é 60%, desempenho superior ao de muitos materiais convencionais comumente comercializados.

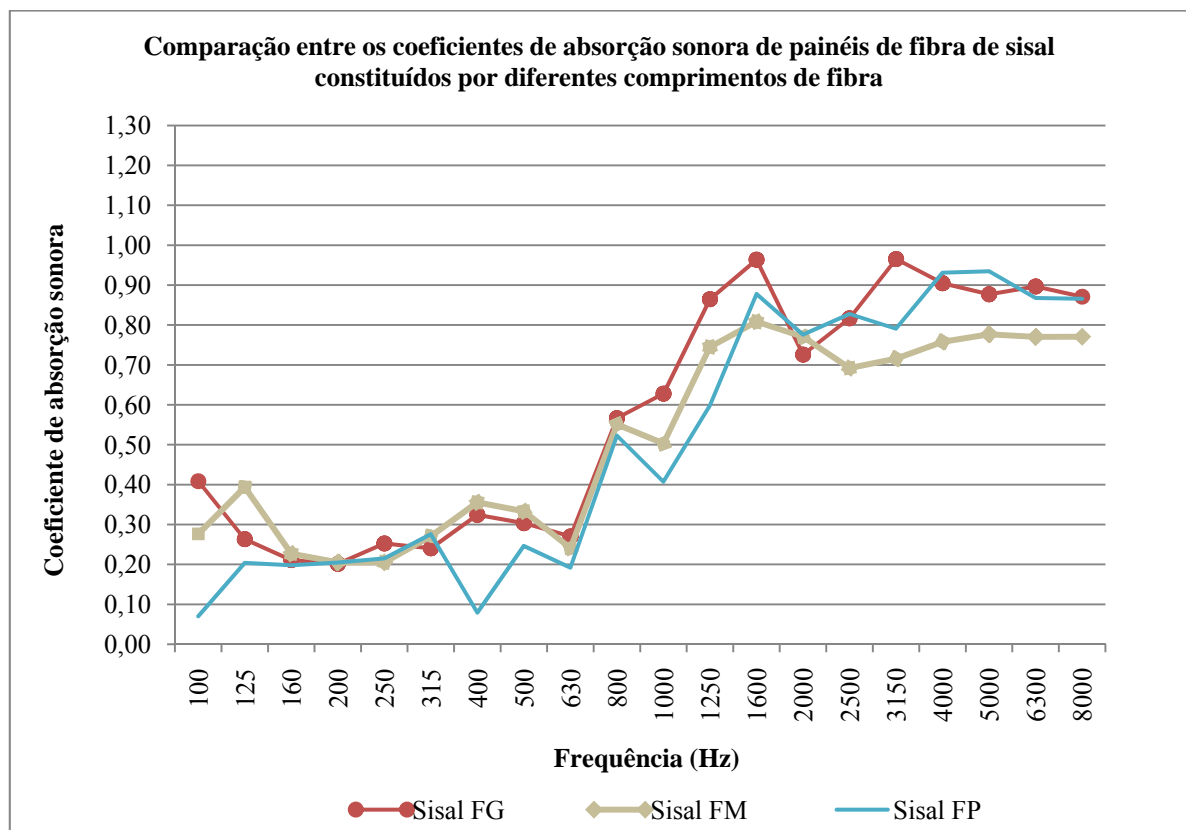


Figura 4.12 - Gráfico comparativo dos valores de coeficiente de absorção sonora de painéis de fibras de sisal de diferentes comprimentos (0,03 m, 0,07 m e 0,1 m).

A Figura 4.13, a seguir, mostra que para uma determinada faixa do espectro de análise (a partir de 1000 Hz) o desempenho acústico do painel de fibra de dendê é satisfatório, e em frequências maiores (a partir de 2000 Hz) esse desempenho melhora ao ponto de ser compatível com materiais comercialmente disponíveis. Dessa forma, pode-se dizer que fabricar um painel a partir de fibras de dendê para se controlar ruídos é uma opção atrativa, pois é de baixo custo, apresenta um desempenho acústico razoável e agrega valor à referida

fibra que, atualmente, é utilizada tão somente como combustível para fornalhas por empresas de refinamento de óleo de palma. Adicionalmente, através de combinações com outras fibras (enquanto painéis mesclados) as características de absorção do painel de fibra de dendê são potencializadas, como pode ser visto, a seguir (ver Figura 4.14), além de corrigir a deficiência apresentada quanto ao odor, anteriormente descrita.

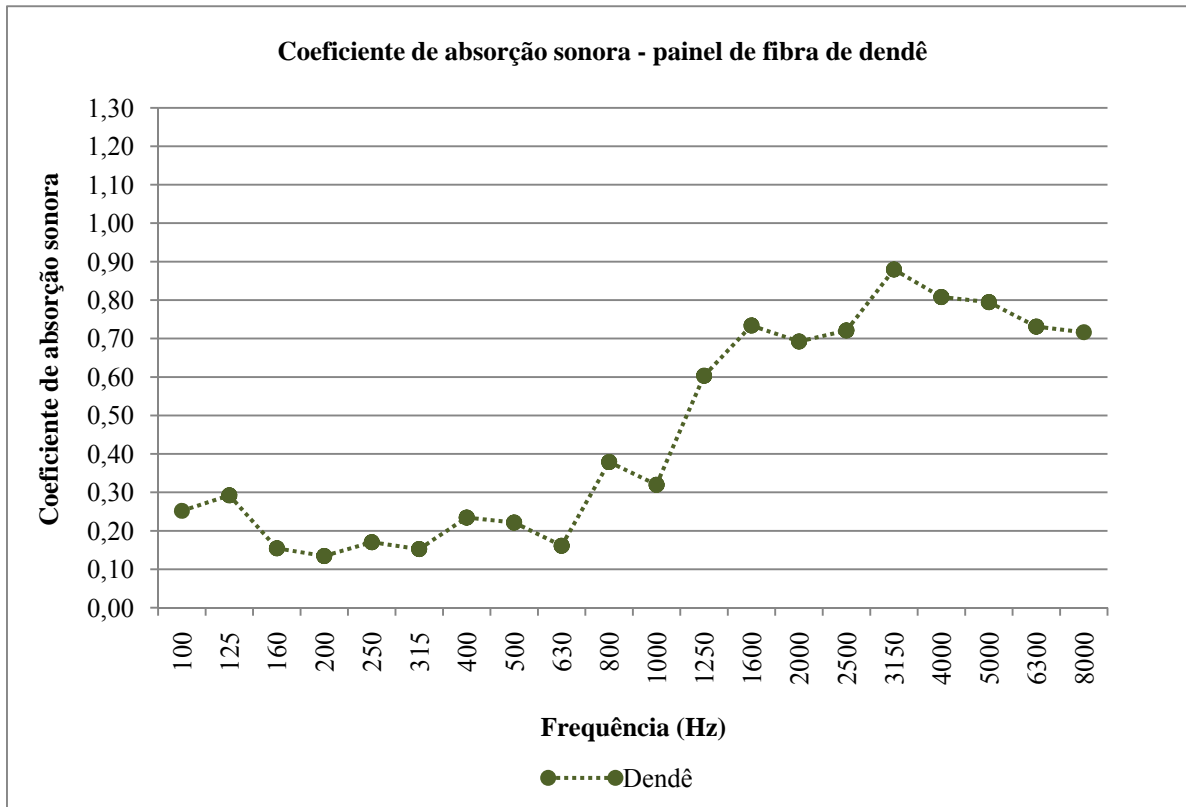


Figura 4.13 - Coeficiente de absorção sonora de um painel artesanal de fibra de dendê.

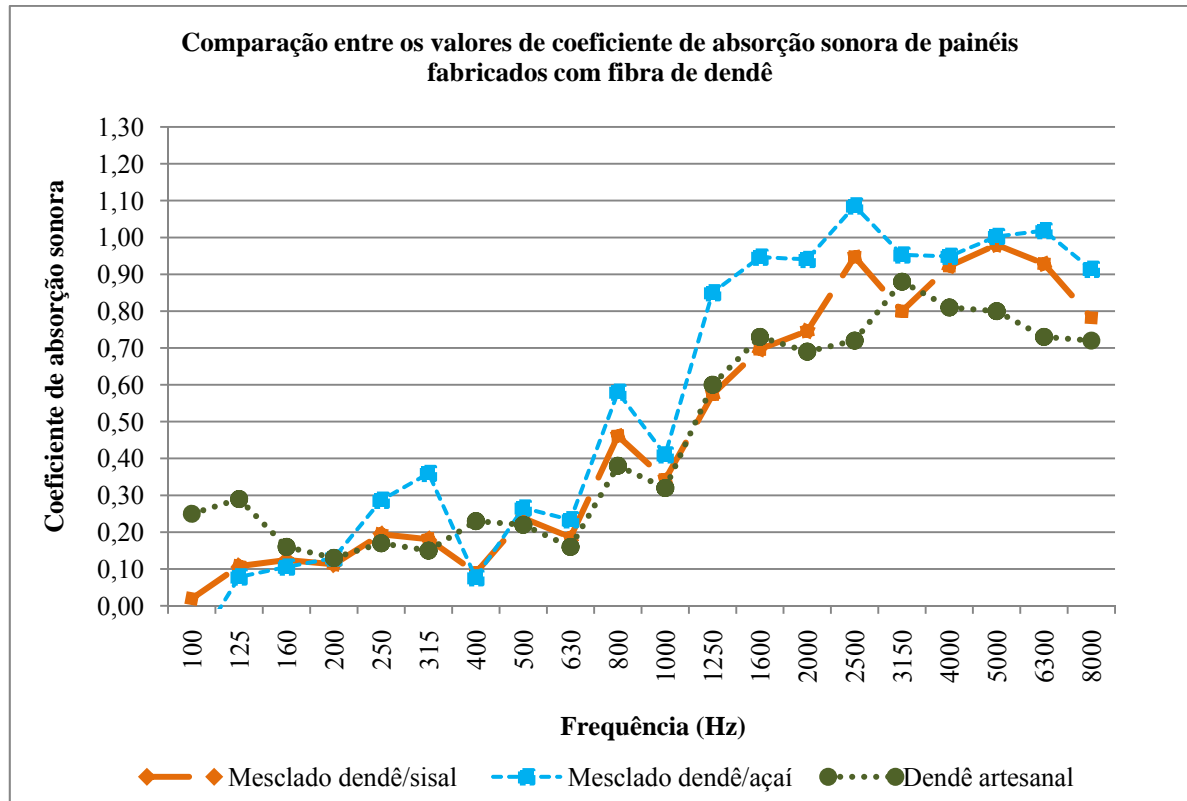


Figura 4.14 - Comparação entre os coeficientes de absorção sonora de um painel unifibra de dendê e mesclados de dendê/sisal e dendê/açai.

Em relação à Figura 4.14, quando se tem coeficientes de absorção sonora maiores que a unidade, fato este, ocorrido devido às variações estatísticas de parâmetros como, por exemplo, posição do(s) microfone(s) e fonte(s), posição da amostra, campo sonoro na câmara, etc., assume-se o valor unitário para o coeficiente de absorção sonora da amostra em questão (GERGES, 2000).

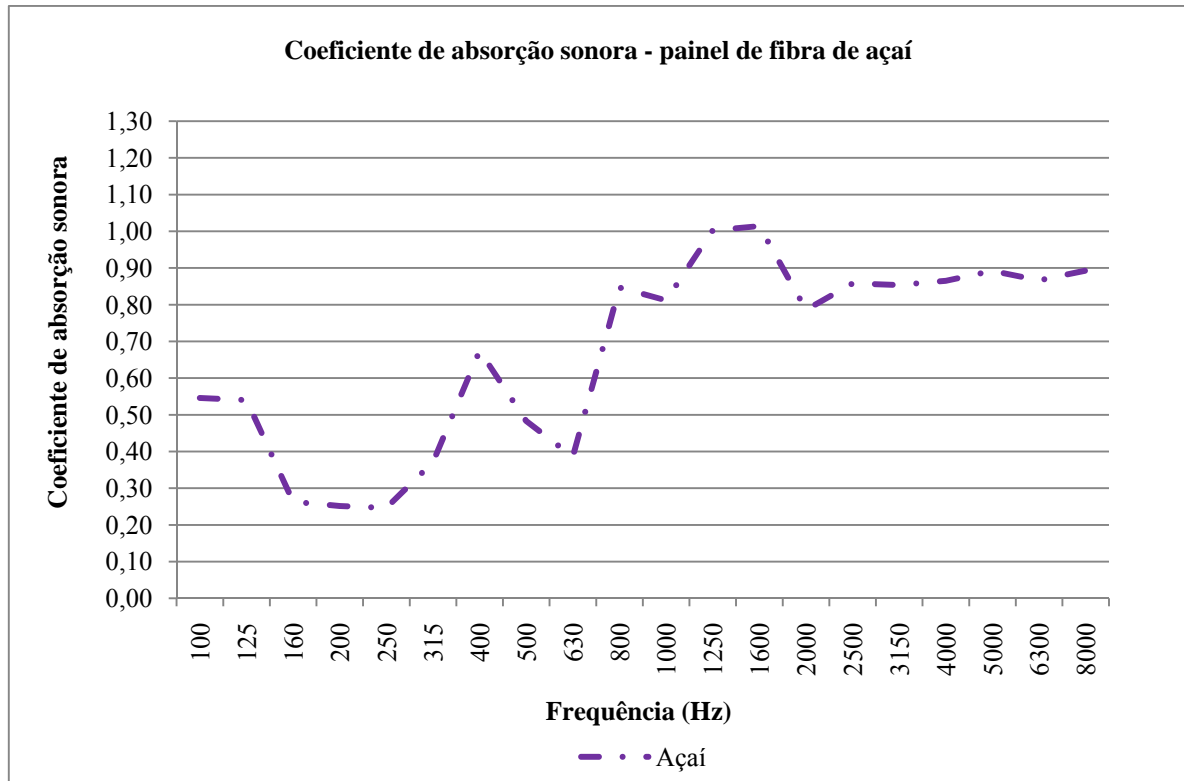


Figura 4.15 - Coeficiente de absorção sonora de um painel artesanal de fibra de açai.

O desempenho acústico do painel de fibra de açai mostrado na Figura 4.15 foi um dos melhores obtidos dentre os materiais analisados. Embora instável nas baixas frequências do espectro, a partir de 1000 Hz possui coeficiente de absorção sonora acima de 80%, credenciando-o como o painel unifibra com melhor desempenho acústico dentre os de mesma categoria aqui ensaiados, sendo compatível, e até superior em algumas frequências, ao desempenho de alguns materiais comercialmente disponíveis, utilizados para a finalidade de controle de ruído.

Analisando-se as Figuras 4.16 e 4.17 nota-se que materiais heterogêneos (neste caso painéis multifibras de açai/coco e sisal FP/coco) proporcionam uma característica denominada versatilidade acústica, pois dependendo da face que esteja voltada para a fonte, a absorção sonora é diferente. Dessa forma consegue-se proporcionar diferentes comportamentos acústicos a uma sala tratada com o mesmo material.

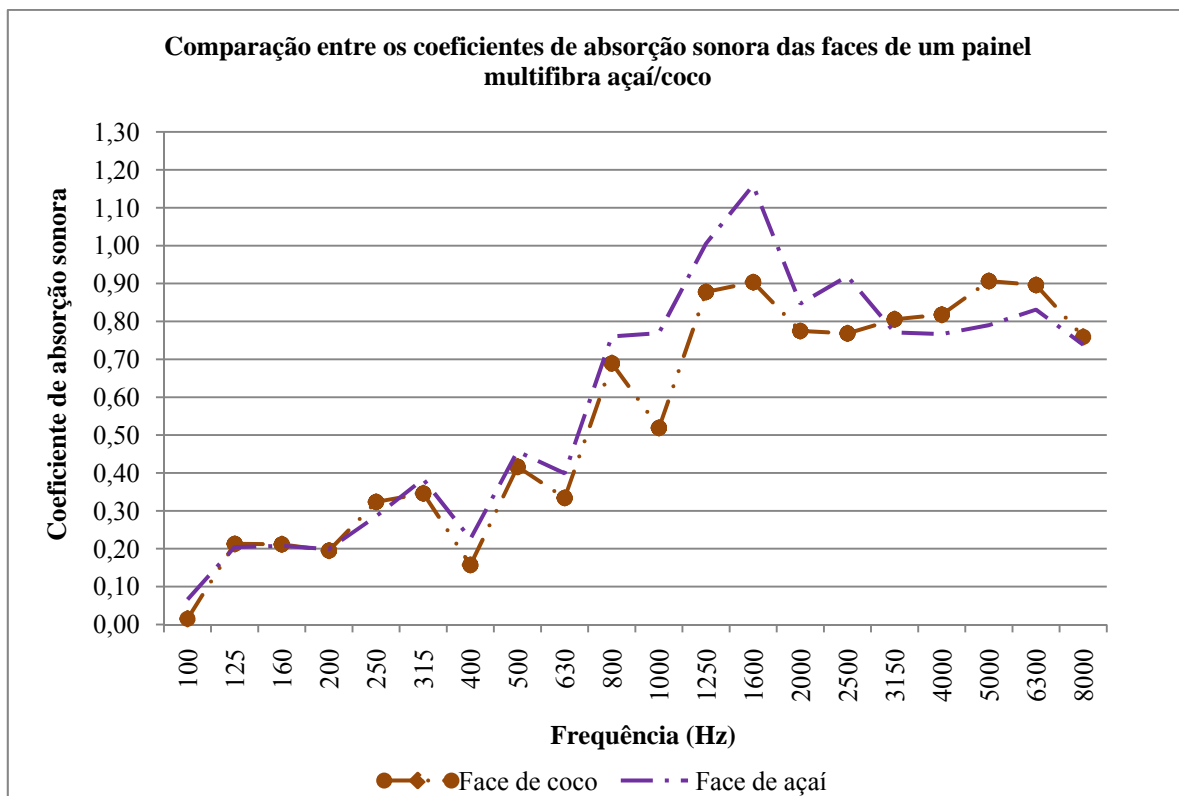


Figura 4.16 - Comparação entre os coeficientes de absorção sonora das faces de um painel multifibra de açai/coco.

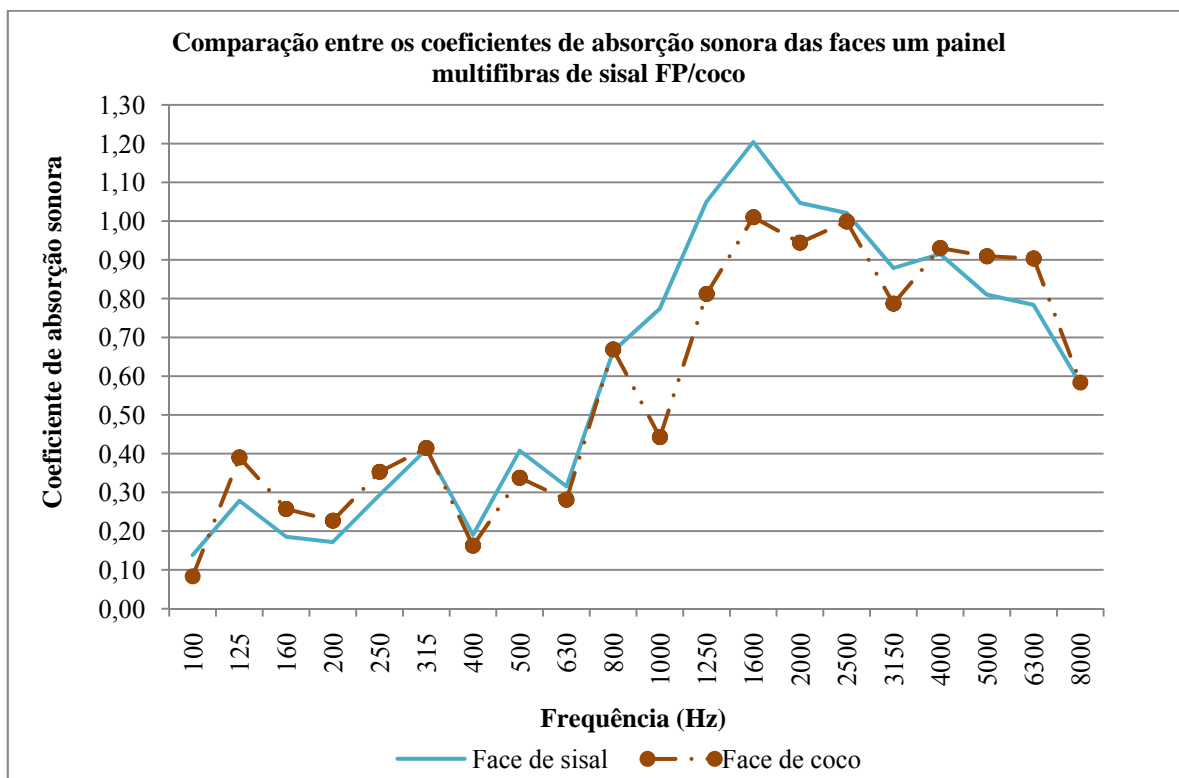


Figura 4.17 - Comparação entre os coeficientes de absorção sonora das faces de um painel multifibra de sisal FP/coco.

No intuito de verificar a influência dos processos industriais na capacidade de absorção sonora das fibras de coco, painéis constituídos por esta fibra, procedentes de diferentes processos, foram analisados quanto aos seus coeficientes de absorção sonora. Os materiais ensaiados foram painéis artesanais, fabricados com fibras *in natura* e painéis industriais, fabricados com fibras que passaram pelo ciclo de processos industriais descrito no capítulo 3. Os resultados obtidos são apresentados a seguir na Figura 4.18.

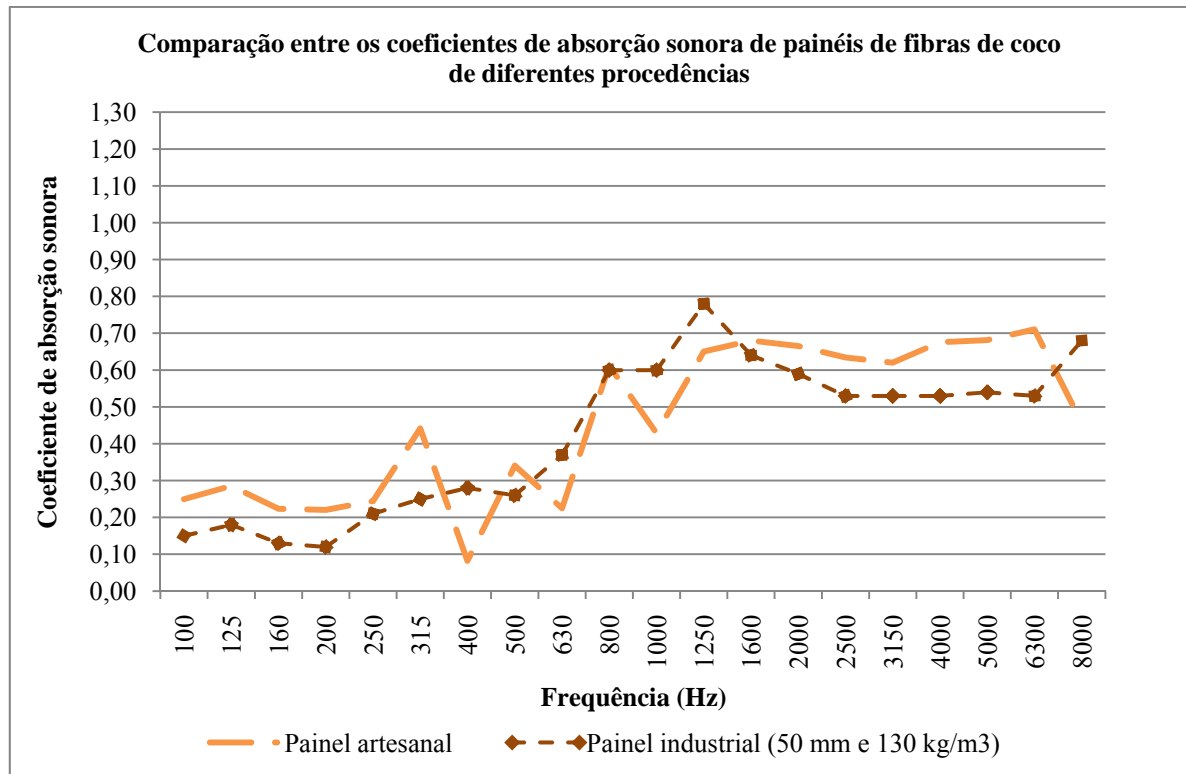


Figura 4.18 - Gráfico comparativo dos valores de coeficiente de absorção sonora de painéis de fibra de coco, fabricados por processo artesanal e industrial.

Analisando-se o gráfico da Figura 4.18, nota-se que o comportamento dos materiais, em relação à capacidade de absorção sonora é semelhante e, na maioria do espectro, o desempenho do painel de fibra de coco artesanal mostra-se superior ao do painel industrial. Em resumo, os processos pelos quais passam as fibras de coco, antes de se tornarem painéis e mantas industriais, não contribuem positivamente para potencializar sua função de absorvedor sonoro, entretanto, são de fundamental importância para melhorar outras características destes produtos, uma vez que facilitam a união das fibras, aumentam sua resistência à tração e a deformações, entre outras propriedades. Por outro lado, podem ser incluídas etapas ao longo do processo produtivo que tenham como objetivo melhorar as características do material sob o aspecto acústico, já que este é comercializado também para esta finalidade.

Objetivando-se fazer uma verificação da concordância entre os coeficientes de absorção sonora obtidos para um mesmo material, porém, ensaiado em diferentes câmaras reverberantes, ensaios foram realizados no Laboratório de Acústica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS. O material utilizado para se verificar a referida concordância foram os painéis de sisal constituído por fibras pequenas (FP - 0,03 m), pois seu tempo de fabricação é um dos menores. Mediu-se o tempo de reverberação da câmara sem amostra (ver Figura 4.20a) e depois com uma área de painéis de sisal equivalente a 10,79 m² (ver Figura 4.20b), e através das Equações (4.1) e (4.3) determinou-se o coeficiente de absorção do material em estudo. Os equipamentos utilizados para realizar estes ensaios (ver Fig. 4.19) foram os seguintes: Calibrador de nível sonoro, Bruel & Kjaer, tipo 4230 (94 dB, 1000 Hz) de número de série 1351791; Fonte sonora, Bruel & Kjaer, tipo 4224, nº1491240; Medidor de nível sonoro, 01dB-Metravib, Blue Solo 01, nº.60266; Pré-amplificador de microfone, 01dB-Metravib, PRE 21 S, No. 12943 e Microfone, GRAS, MCE 212, No. 75246.



Figura 4.19 - Da esquerda para a direita: microfone, fonte sonora, medidor de nível de pressão sonora e computador.

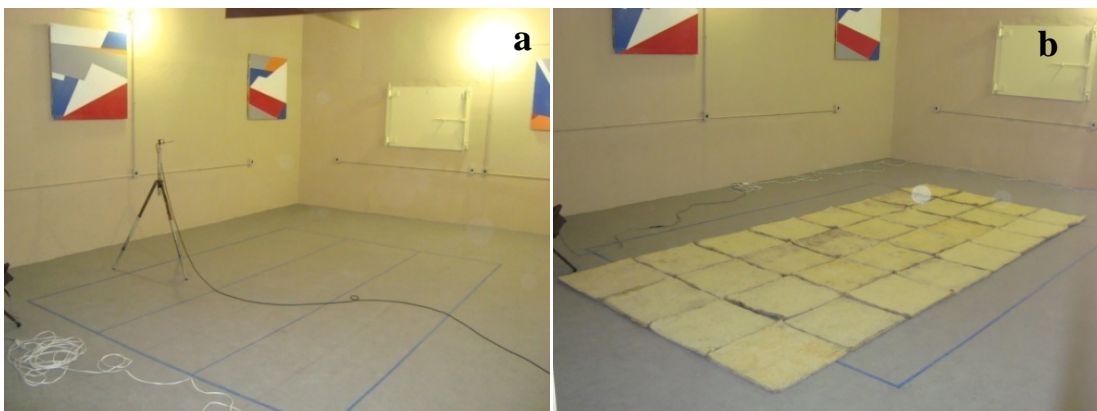


Figura 4.20 - (a) Câmara reverberante vazia (sem amostras) e com amostras de sisal (b).

A concordância entre os coeficientes de absorção sonora, obtidos nas diferentes câmaras, é mostrada a seguir (ver Figura 4.21), através de valores médios e seus respectivos desvios padrão (DP).

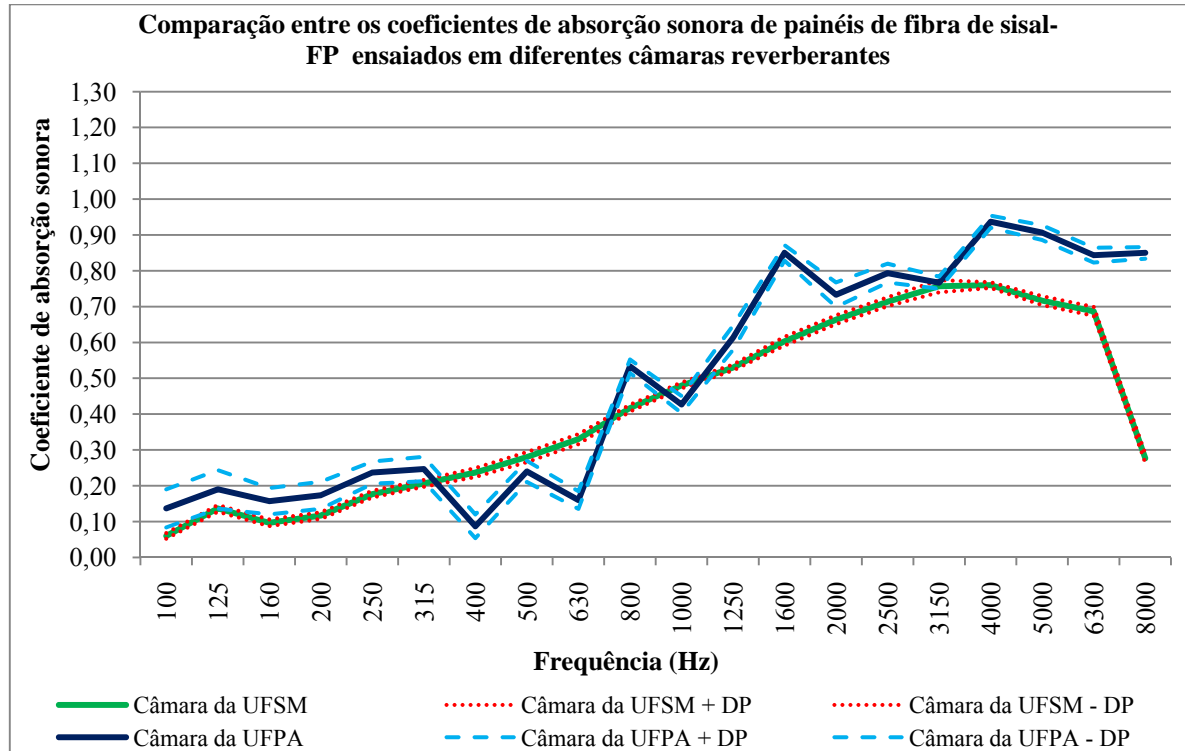


Figura 4.21 - Gráfico comparativo dos valores de coeficiente de absorção sonora de painéis artesanais de fibra de sisal FP ensaiados em diferentes câmaras reverberantes.

Analisando-se o gráfico da Figura 4.21 nota-se que os valores médios obtidos para o coeficiente de absorção sonora dos painéis de fibras sisal, na minicâmara, foram sensivelmente diferentes quando comparados com os valores obtidos na câmara em tamanho real, porém a tendência que apresentaram foi a mesma. Essas diferenças se devem ao fato de os resultados obtidos, através de câmaras reduzidas, serem influenciados pelo grau de difusão de seu campo sonoro, o qual está diretamente relacionado às características construtivas do material da câmara, isto é, quanto mais rígido é o material de revestimento interno da câmara, mais difuso será seu campo sonoro. Além dos fatores dimensionais, uma vez que uma câmara de tamanho reduzido não contribui para a difusão sonora em seu interior. Outro fator importante que contribuiu para que os resultados apresentassem essas pequenas divergências, foi a fonte sonora utilizada nos ensaios na câmara em tamanho real, a qual não conseguia excitar de forma satisfatória os modos acústicos da câmara nas mais altas frequências (acima de 3150 Hz) do espectro analisado.

Adicionalmente, quando comparações de desempenho acústico são feitas, mesmo mantendo determinados parâmetros sob controle, como as condições climáticas (temperatura e umidade relativa) do ambiente de ensaio, por exemplo, os resultados obtidos para uma mesma amostra podem apresentar diferenças, isso se deve às variações dos parâmetros envolvidos nas formulações inerentes ao método estatístico de ensaio utilizado em câmaras reverberantes.

Assim, devido às diferenças existentes entre as câmaras reverberantes utilizadas, equipamentos de medição (fonte sonora, microfone, etc.), área equivalente de amostra, condições climáticas, entre tantas outras, era de se esperar que os resultados apresentassem diferenças. Além disso, não está sendo utilizado o fator de escala para deslocar a faixa de frequência de análise dos resultados obtidos na minicâmara para tornar a comparação mais adequada, pelo contrário, analisando-se os resultados sem fator de escala só comprova que a minicâmara é uma câmara reverberante válida. Contudo, em relação aos painéis de fibras de sisal, os valores de coeficiente de absorção sonora assumidos são os obtidos na câmara reverberante real.

Para mostrar que a câmara reverberante em tamanho real também está em conformidade com as exigências da norma ISO 354/1999, anteriormente citadas, as figuras apresentadas a seguir mostram que foram respeitadas a exigência que estabelece uma diferença mínima de 15 dB, para todas as frequências de bandas de 1/3 de oitava, entre o NPS devido à presença da fonte na sala e o NRF (ver Figura 4.22), e aquela em que o coeficiente de absorção sonora das superfícies da referida câmara tem de ser tão baixo quanto possível (ver Figura 4.23).

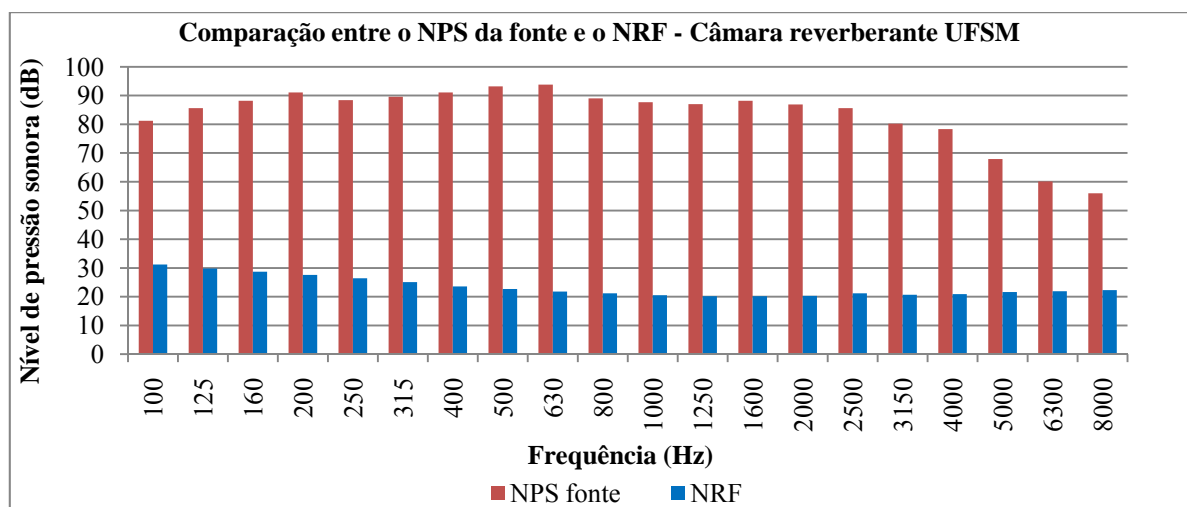


Figura 4.22 - Comparação entre o NPS devido à fonte no interior da câmara reverberante e o NRF em um dia típico.

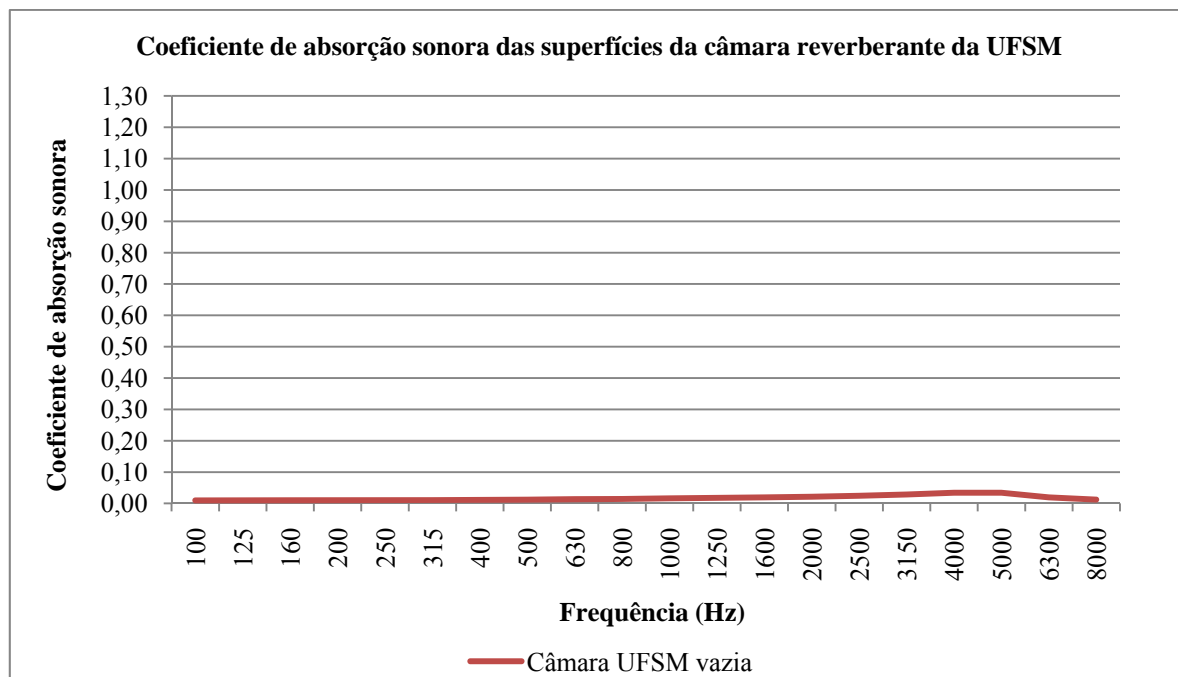


Figura 4.23 - Coeficiente de absorção sonora das superfícies da câmara reverberante da UFSM.

São apresentadas a seguir, as curvas do coeficiente de absorção sonora em função da frequência, de materiais comercialmente disponíveis, obtidas na minicâmara reverberante da UFPA (ver Figura 4.24).

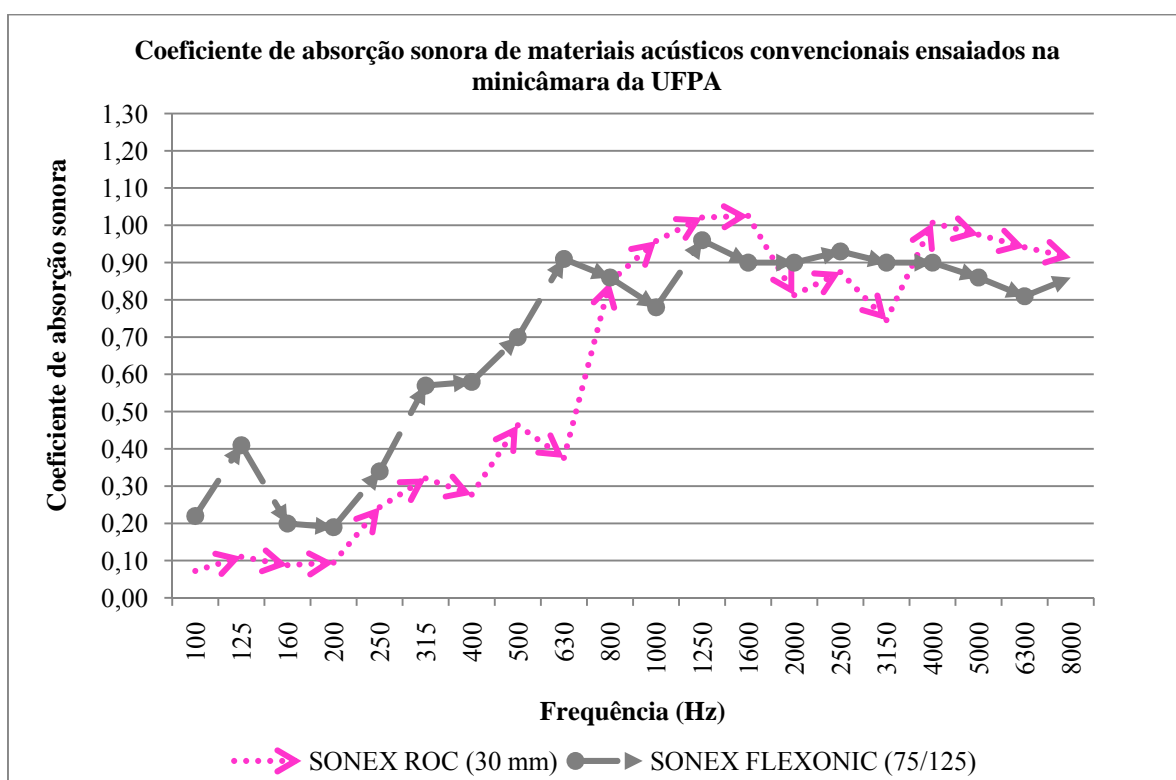


Figura 4.24 - Coeficiente de absorção sonora de materiais acústicos convencionais.

Comparando o desempenho acústico dos materiais acústicos convencionais ensaiados com painéis unifibra (ver Figura 4.25), com painéis mesclados (ver Figura 4.26) e com painéis multicamadas (ver Figura 4.27), tem-se os seguintes resultados:

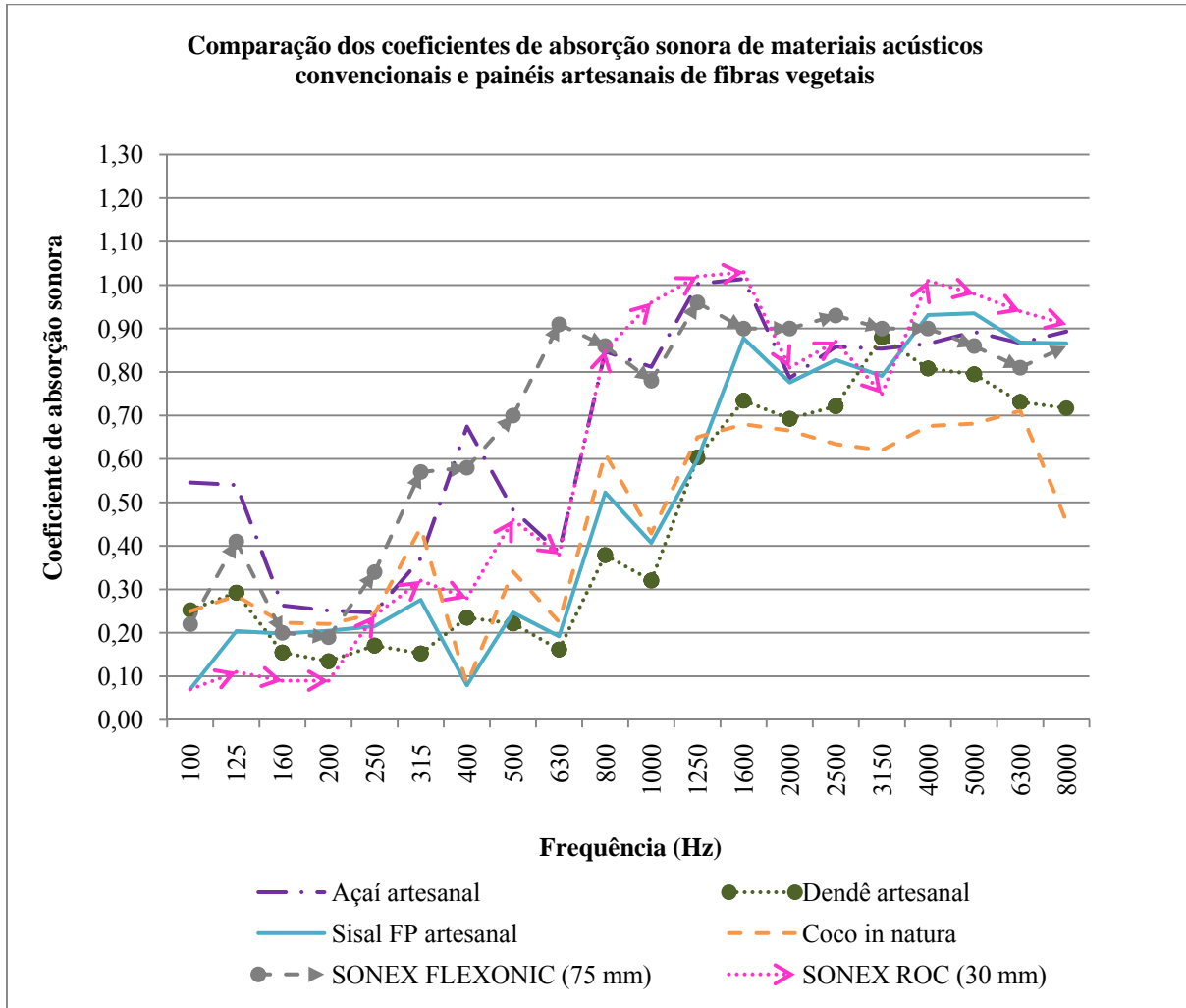


Figura 4.25 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos convencionais e painéis unifibra.

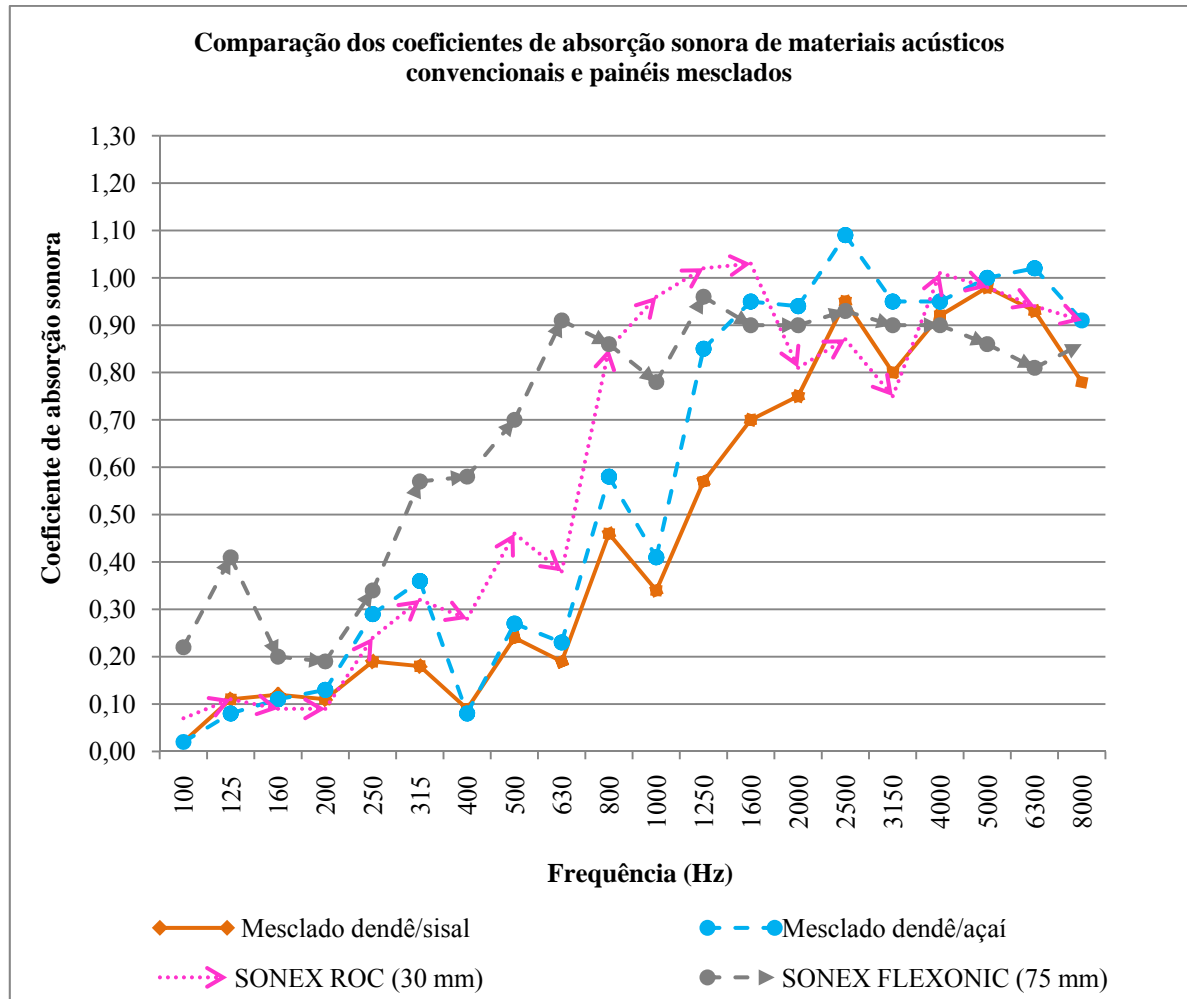


Figura 4.26 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos convencionais e painéis mesclados.

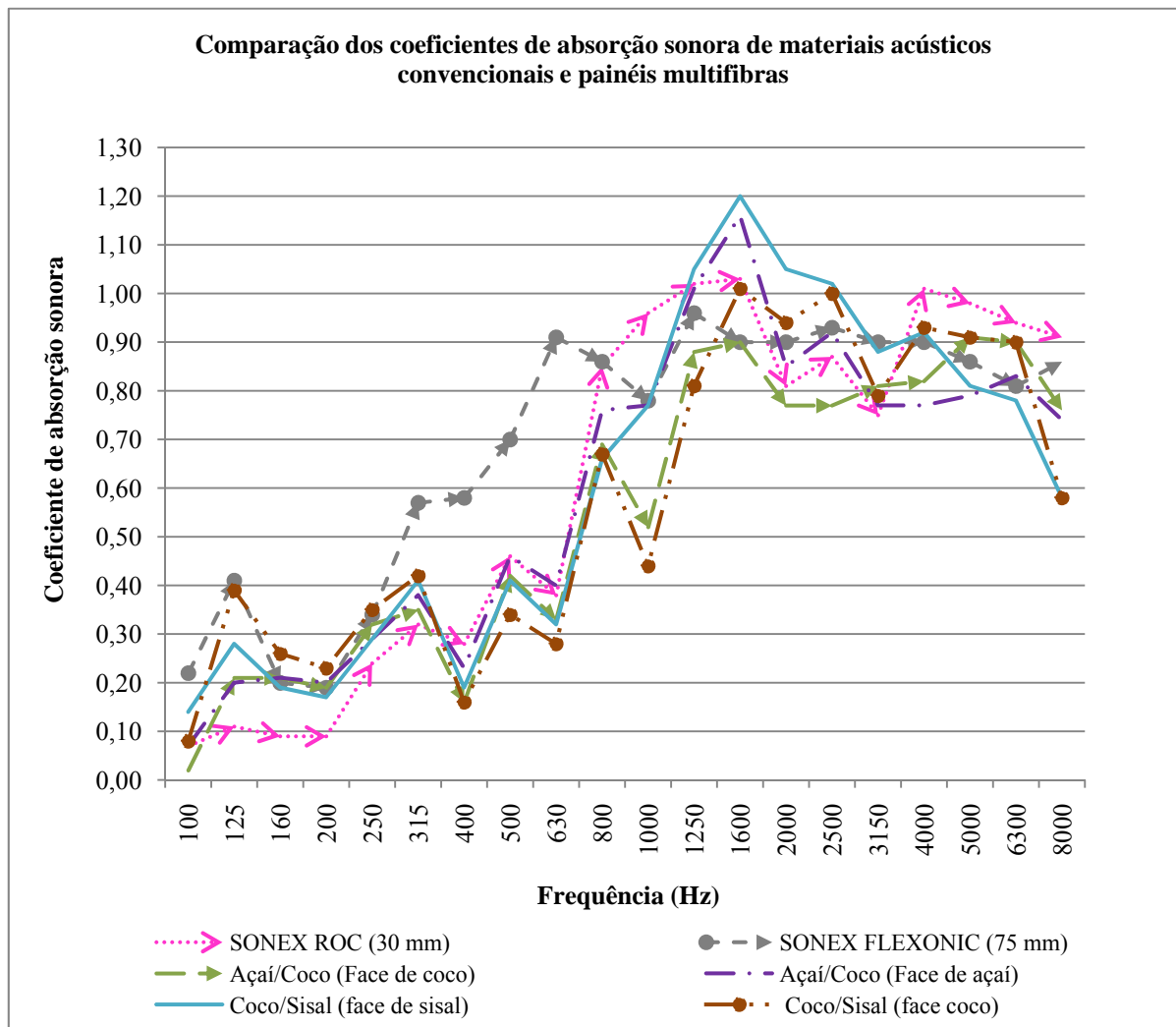


Figura 4.27 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos convencionais e painéis multifibras.

A partir dos resultados apresentados nos gráficos das Figuras 4.25, 4.26 e 4.27, pode-se dizer que, de uma forma geral, todos os painéis fabricados a partir de fibras vegetais, mostraram-se bons absorvedores sonoros, apresentando uma eficiência maior em médias e altas frequências, faixa de atuação mais comum para materiais deste tipo. É importante mencionar, que não foram levadas em consideração a espessura e a densidade dos painéis artesanais nas comparações de desempenho com materiais convencionais, algo que tornaria mais evidente a superioridade dos painéis artesanais. Além disso, muitas combinações de fibras não foram ensaiadas e sequer concebidas, pois, se alterando parâmetros como proporção de fibras em um painel mesclado ou utilizando-se três ou mais fibras na composição de um painel multifibras (haja vista que para as combinações aqui feitas, tanto para painéis mesclados quanto para painéis multifibras, foram utilizadas apenas dois tipos de

fibras), as combinações podem ser muito variadas, podendo surgir um material com características ainda melhores.

Contudo, as análises feitas neste trabalho buscaram estabelecer uma comparação qualitativa entre os materiais investigados, testando-os no mesmo ambiente sob as mesmas condições, isto é, aqueles materiais que apresentaram bom desempenho na minicâmara, apresentarão também bom desempenho em câmaras reverberantes reais. Portanto, os painéis de fibras vegetais analisados podem ser utilizados como materiais acústicos uma vez que apresentaram bom desempenho nos ensaios experimentais e suas propriedades acústicas são agora, conhecidas e satisfatórias.

Conhecer as propriedades acústicas de materiais é muito útil para a predição do comportamento acústico de um ambiente, pois, utilizando-se *softwares* de simulação, consegue-se precisão e eficiência nos resultados, ainda que este ambiente esteja na fase de projeto.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUÇÃO

A necessidade de previsão do ruído em ambientes de trabalho implica na construção de modelos de simulação (SOUZA,1997). Em outras palavras, para que os parâmetros acústicos de um ambiente possam estar de acordo com os padrões previstos para sua finalidade, é recomendável que se faça uma predição de ruído neste ambiente, através de modelos de simulação, para que sejam obtidos resultados com boa precisão em um tempo de processamento relativamente curto, reduzindo custos e aumentando a eficiência de projetos, quando da seleção correta e quantidade certa de material a ser utilizada para se efetuar um tratamento acústico neste ambiente.

Algumas equações clássicas da acústica de salas não são suficientes para oferecer bons resultados quando as salas assumem geometria complexa ou quando idealizações não podem ser feitas (MELO et al., 2007). Para transpor essas dificuldades, técnicas numéricas são utilizadas, proporcionando bons resultados para salas com geometria altamente complexa e materiais de revestimento diversos (CAMILO; TENEBBAUM; COELHO, 2002). Os métodos numéricos utilizados com grande êxito reconhecido são o de traçado de pirâmides (ver Figura 5.1a) e cones (ver Figura 5.1b), o das imagens ou fontes virtuais (ver Figura 5.2), o de traçado de raios (ver Figura 5.3) e o da transição da energia. No entanto, o uso de apenas um método para simular todos os fenômenos da propagação do som (reflexão, absorção, difusão, difração, transmissão e interferência) não produz resultados satisfatórios, fazendo-se necessária, portanto, a utilização de modelos híbridos (TENEBBAUM; CAMILO, 2004). Além da modelagem da propagação sonora, deve-se também modelar outros elementos tais como fontes, receptores e contornos da sala.

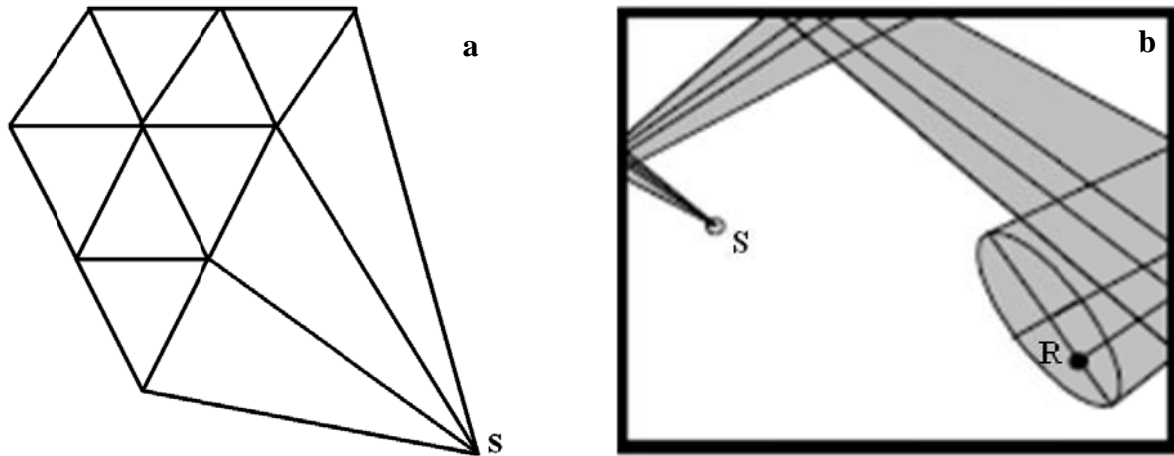


Figura 5.1 - (a) Métodos de traçado de pirâmides e (b) de traçado de cones.

Fonte: (RAYNOISE, 1993).

5.1.1 Método das imagens ou fontes virtuais

No método das imagens ou fontes virtuais, utiliza-se fonte imagem especular virtual para traçar os caminhos das reflexões sonoras da fonte ao receptor, considerando-se a distância percorrida e as atenuações ocorridas em cada reflexão para contabilizar a parcela de energia das fontes imagem de primeira ordem e ordens superiores.

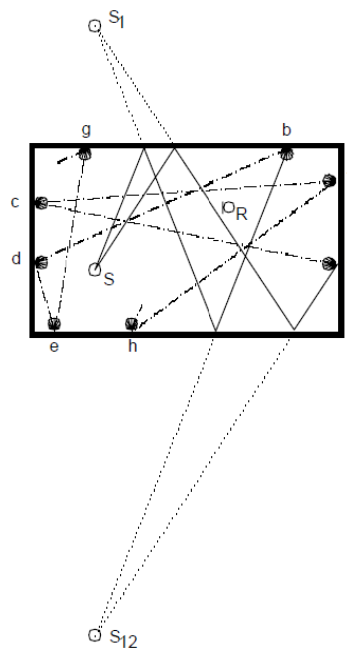


Figura 5.2 - Fonte sonora (S), Receptor (R), Fontes imagem de primeira (S_1) e segunda ordem (S_{12}).

Fonte: (ODEON, 2008).

Em resumo, a utilização deste método facilita a determinação da direção de um raio refletido que deve atingir um ouvinte em uma determinada posição da audiência,

simplificando, portanto, o posicionamento de painéis refletores no teto e/ou paredes de uma sala.

5.1.2 Método dos raios acústicos ou traçado de raios

Neste método a modelagem da onda sonora é feita por analogia a raios luminosos, baseando-se na acústica geométrica. Assume-se que a energia emitida pela fonte sonora é distribuída igualmente entre um número discreto de raios sonoros, dessa forma, ao colidirem com as superfícies da sala, o nível de energia de cada raio decresce com as reflexões devido à absorção das superfícies e progressivamente com a absorção do ar. Quando a energia de um raio não for mais representativa, a propagação é interrompida.

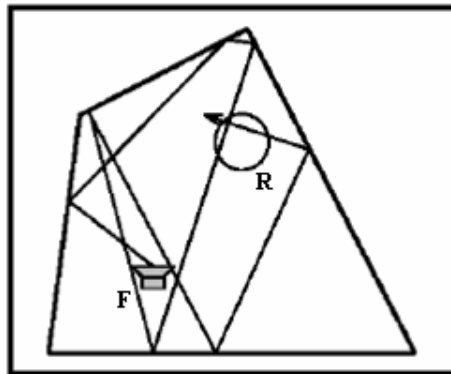


Figura 5.3 - Traçado de um raio acústico da fonte sonora (F) ao receptor (R).

Fonte: (RAYNOISE, 1993).

O método de traçado de raios oferece uma série de vantagens em termos de simplificação e facilidade de visualização de um problema. Entretanto, sua aplicabilidade fica limitada a problemas onde o comprimento de onda é significativamente pequeno em relação às dimensões geométricas do caso estudado (MEDEIROS, 2002).

5.1.3 Métodos híbridos

Os métodos híbridos são métodos que procuram simular os fenômenos mais importantes em acústica de salas (absorção do ar e fronteiras, reflexão especular e reflexão difusa) através de combinações de métodos numéricos (ver Figura 5.4).

Figura 5.4 - Distribuição de energia do raio incidente pela absorção, reflexão difusa e reflexão especular em um método híbrido.

Fonte: (TENEBAUM; CAMILO, 2004).

O *software* utilizado para realizar as simulações neste trabalho, foi o ODEON 9.2 *Combined 3.2*, por ser de grande êxito reconhecido e ser o *software* disponível na infraestrutura do Grupo de Vibrações e Acústica da UFPA à época da realização do trabalho. O referido *software* reproduz o fenômeno de propagação acústica em ambientes internos, incluindo reflexão e difusão sonora, absorção das paredes e do ar, difusão e transmissão através de paredes. Sua metodologia é baseada nos métodos, da fonte imagem especular, de raios acústicos e um método híbrido (*Reflection Based Scattering method*) combinando esses dois métodos (VIEIRA, 2008), associando assim, a natureza determinística, proveniente do método da fonte imagem, com algumas características estatísticas do método de raios acústicos (SOUZA, 1997).

Embora utilize métodos que fornecem resultados com boa precisão e eficiência, este *software*, assim como outros, possui limitações. Como é um modelo com maior confiabilidade para altas frequências, suas superfícies devem ser (quase) planas e tão grandes quanto possível, minimizando assim o efeito da difração sonora para baixas frequências. Adicionalmente, superfícies muito pequenas, modeladas na tentativa de atingir alta fidelidade

geométrica, resultam em piores ao invés de melhores resultados e, provavelmente, levam um tempo maior para o processamento dos cálculos.

A aproximação de uma superfície curva através de uma superfície com seções planas depende da superfície curva em si e do quão importante essa superfície é. Curvas convexas, por exemplo, dispersam naturalmente energia sonora (ver Figura 5.5b), então se essa superfície está exposta, deve-se evitá-la, por exemplo, substituindo um quarto de círculo, que poderia agir como um refletor, por um plano único de 45° . Por outro lado, curvas côncavas naturalmente concentram energia sonora (ver Figura 5.5a), e uma vez que a focalização (ver Figura 5.6) é um efeito que se deseja inserir no modelo, esta deve ser preservada.

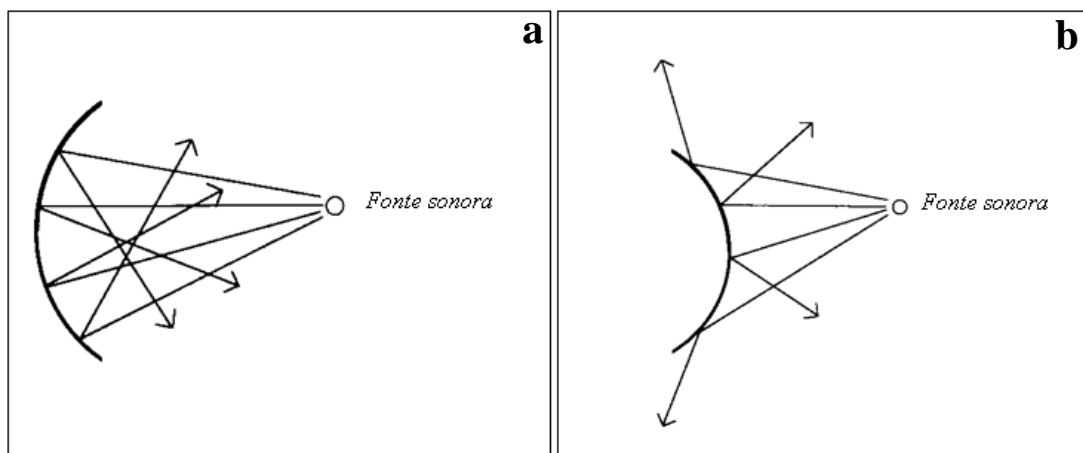


Figura 5.5 - Espalhamento devido a um refletor (a) côncavo e (b) um convexo.

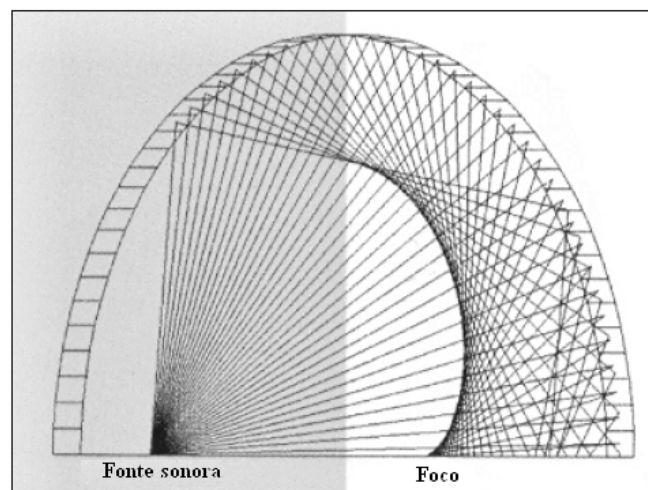


Figura 5.6 - Efeito de Focalização.

No entanto, isso não significa que muitas subdivisões são a solução. A utilização de muitas superfícies pode tornar o modelo visualmente complexo, aumentando o tempo de cálculo além de aumentar a probabilidade de erros.

Em relação à faixa de frequência, os resultados são fornecidos somente em bandas de oitava, impedindo um estudo mais detalhado de ambientes, etc.

5.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

O ambiente utilizado para análise foi uma sala de aula (DP-11) do Campus Profissional da UFPA, localizada no Bloco D, referente ao curso de Engenharia Mecânica. A sala conta com carteiras (para alunos e professor), mesa e porta de madeira, janelas de vidro, quadro magnético, aparelhos de ar condicionado e um armário para retro-projetor. Este ambiente é utilizado para ministrar aulas, apresentar trabalhos, etc., sendo, portanto, um ambiente em que a fala deve ser privilegiada, isto é, em que o campo direto deve ser priorizado, de modo que a difusão sonora seja controlada e as reflexões não prejudiquem sua inteligibilidade. Inteligibilidade esta, influenciada pelas dimensões, forma, orientação e natureza das superfícies e objetos presentes na sala, bem como pelo nível de ruído de fundo.

De acordo com a finalidade da sala e baseando-se na norma ISO 3382/1997, foram analisados os seguintes parâmetros para avaliar sua qualidade acústica: Tempo de Reverberação baseado no termo T_{30} , Tempo de Decaimento Inicial (*EDT*), Definição (D_{50}) e Índice Rápido de Transmissão da Fala (*RaSTI*), para cada banda de oitava entre 125 Hz e 8 kHz. Devido ao tamanho reduzido da sala não foi analisada a distribuição do nível de pressão sonora do ambiente, considerando que esta distribuição ocorre de forma satisfatória.

5.2.1 Tempo de Reverberação (TR)

O tempo de reverberação é o tempo necessário para que o nível de pressão sonora, em um ambiente, diminua 60 dB. No caso deste trabalho, o tempo de reverberação é baseado no termo T_{30} , utilizado por questões normativas haja vista que em alguns ambientes, a diferença entre o nível gerado pela fonte e o nível de ruído de fundo, não chegam a apresentar uma diferença de 60 dB.

No Brasil não existe norma que estabeleça valores ideais para o tempo de reverberação em salas de aula (BERTOLI, 2001). Porém, segundo a norma ANSI S 12.60 / 2002 – *Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools*, a primeira a especificar parâmetros sobre a acústica de escolas, o tempo de reverberação ótimo para uma sala de aula varia entre 0,4 e 0,6 segundos.

5.2.2 Tempo de Decaimento Inicial (*EDT – Early Decay Time*)

O parâmetro *EDT* (*Early Decay Time – Tempo de Decaimento Inicial*) é o tempo necessário para que a curva de decaimento energético caia os primeiros 10 dB. A taxa de decaimento inicial de sons é tão importante quanto o tempo de reverberação (TR). Pois, um decaimento inicial rápido, é interpretado pelo ouvido humano como se o tempo de reverberação de um ambiente fosse curto.

Para ambientes em que a fala deve ser privilegiada, deseja-se que esta tenha *Intimidade* – parâmetro subjetivo relacionado ao *EDT* que promove a sensação de que a sala possui um volume menor do que seu volume real.

O Tempo de Decaimento Inicial pode, então, ser determinado pela Eq. (5.1).

$$EDT = \frac{RT_{60}}{6} \quad (5.1)$$

Recomenda-se que os valores obtidos para este parâmetro, para a finalidade do ambiente estudado, sejam $< 1,0$ s.

5.2.3 Fator de Clareza (C_{80}) e Definição (D_{50})

Definição baseia-se na característica da audição na qual reflexões que atinjam o ouvinte em um intervalo de tempo de até 50 ms após a chegada do som direto, são consideradas “reflexões úteis”, no sentido de que se somam ao som direto, contribuindo para a audibilidade do som sem efeitos colaterais negativos. Por outro lado, reflexões mais tardias são percebidas subjetivamente como efeitos prejudiciais introduzidos pela sala, que se manifestam como reverberação e, no caso de reflexões isoladas, como ecos.

Já o parâmetro *Fator de Clareza*, avalia a clareza de uma sala, obtida através do som direto mais as primeiras reflexões que chegam nos primeiros 80 ms. Em outras palavras, compara-se a energia contida no som direto mais a energia das reflexões úteis, com a energia total da resposta impulsiva.

Ambas comumente são relacionadas à inteligibilidade da fala, porém, há sensíveis diferenças, como pode ser visto nas Eq. (5.2) e (5.3):

$$C = \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} p(t)^2 dt} \quad (5.2)$$

$$D = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} p(t)^2 dt} \quad (5.3)$$

em que $p(t)$ é o valor da pressão acústica em um determinado instante.

Ou seja, dependendo se os resultados pretendidos relacionam-se à música ou à fala, trata-se de “Clareza” ou “Definição”, respectivamente. Para garantir uma boa inteligibilidade da fala, o valor recomendado para o parâmetro *Definição* (D_{50}) deve ser o maior possível e não inferior a 0,5.

5.2.4 *RaSTI* (Índice Rápido de Transmissão da Fala)

O parâmetro *RaSTI* é uma versão simplificada do parâmetro *STI* (*Speech Transmission Index* - Índice de Transmissão da Fala) e tem por objetivo quantificar a inteligibilidade da palavra em ambientes fechados. Seus valores variam entre 0 (inteligibilidade nula) e 1 (inteligibilidade perfeita), portanto, resumidamente, pode-se dizer que este índice indica a percentagem de sílabas realmente compreendidas em uma determinada palavra falada (MATEUS et al., 2008). O valor recomendado para este parâmetro, tendo-se como referência o ambiente analisado, deve ser o maior possível e não inferior a 0,65.

Muitos outros parâmetros não foram mencionados anteriormente, mas nem por isso deixam de ser tão importantes quanto os aqui abordados, como é o caso da relação sinal/ruído (S/N), que é a diferença entre os níveis sonoros da fonte e do ruído de fundo. Em uma sala de aula, quando a relação sinal/ruído é positiva, a voz do professor se sobrepõe aos demais ruídos; já quando apresenta valores negativos, indica que o ruído de fundo está mais elevado que a voz do professor. Para relações de sinal/ruído entre 0 e +10 dB a inteligibilidade é inaceitável, entre +20 e +30 dB, é boa e, entre +30 e +40 dB é excelente, considerando que os valores de outros parâmetros, como o Tempo de Reverberação, por exemplo, estejam de acordo com os padrões estabelecidos para a finalidade da sala.

Outro parâmetro importante é o Percentual de Perda de Articulação de Consoantes (%ALCons), pois, se em um ambiente a porcentagem média de sílabas detectadas corretamente é de 85%, considera-se que a perda de informação é de 15%; esta perda é associada a uma percepção incorreta das consoantes (responsáveis pela inteligibilidade da fala humana) e essa perda é indicada pelo referido parâmetro. Dessa forma, quanto maior for a perda de informação, pior será a inteligibilidade neste ambiente (TORO, 2005). Enfim,

existem vários outros parâmetros que indicam determinadas características a respeito da qualidade acústica de um ambiente, seja qual for sua finalidade.

5.2.5 Equipamentos utilizados para realizar as medições *in loco*

Definida a sala e os parâmetros acústicos a serem analisados, foram definidos também os equipamentos a serem utilizados para a realização das medições *in loco*. Estes foram os seguintes:

- Fonte sonora omnidirecional (dodecaédrica);
- Microfone omnidirecional e suporte (tripé);
- Placa de aquisição de áudio;
- Amplificador analógico;
- Computador.

5.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS

O *software* utilizado para a determinação dos parâmetros acústicos anteriormente mencionados foi o *software* DIRAC 4.0, o qual se baseia na obtenção da Resposta Impulsiva (*Impulsive Response*) do sistema sob investigação. A Resposta Impulsiva Acústica é uma função temporal da pressão sonora de um ambiente, que resulta da excitação desse espaço por uma função que se aproxima da função delta de Dirac (VORLÄNDER; BIETZ, 1994). Esta técnica permite que, através de uma única medição, se tenha todas as informações a respeito do sistema, ou seja, a resposta impulsiva (*IR*) de um espaço acústico fornece uma descrição precisa desse sistema, a partir da qual todos os parâmetros acústicos definidos pela norma ISO 3382 são obtidos diretamente. As respostas impulsivas são medidas e salvas e os parâmetros acústicos calculados a partir dessas respostas.

O sinal utilizado para determinar os parâmetros da sala foi o sinal *MLS* (*Maximum Length Sequence*). A utilização deste sinal requer algumas precauções como, por exemplo, o sistema sob teste tem de ser invariante no tempo, o tempo de duração (comprimento) do sinal *MLS* tem de ser mais longo do que o da resposta impulsiva do sistema ou, pelo menos, ter a mesma duração, caso contrário, algumas partes da resposta computada serão perdidas. As medições utilizando-se *MLS* tem uma relação positiva sinal/ruído muito elevada, pois a correlação cruzada utilizada para computar a resposta impulsiva reduz todos os ruídos de fundo (não correlacionados com o sinal *MLS*), para que medições também possam ser realizadas em ambientes ruidosos. A utilização de técnicas que lidam com valores médios podem aumentar ainda mais essa relação sinal/ruído.

Para realizar as medições foram utilizados os seguintes equipamentos: placa de aquisição de áudio da fabricante *M AUDIO*, uma fonte sonora omnidirecional da fabricante B&K tipo 4296, de número de série 2448557 e um microfone omnidirecional tipo TC25 com faixa de frequência de atuação de 9 Hz a 25 kHz da fabricante *Earthworks*. Esses equipamentos são mostrados a seguir na Figura 5.7 e as configurações da sala durante as medições com e sem audiência são mostradas na Figura 5.8. Foram utilizadas duas posições diferentes de fonte e seis posições aleatórias de microfone para cada posição de fonte, totalizando 24 medições para cada configuração de ensaio do ambiente, respeitando o número mínimo de medições sugerido pela norma ISO 3382, cujo é de 12 medições.



Figura 5.7 - Equipamentos utilizados para realizar as medições de tempo de reverberação, da esquerda para a direita: sistema de aquisição de dados, microfone omnidirecional e fonte sonora.



Figura 5.8 - Sala analisada durante medição de tempo de reverberação (a) sem audiência e (b) com audiência.

É importante que a audiência que ocupe a sala seja significativa, de modo que sejam obtidas diferenças consideráveis no parâmetro utilizado como referência quando feitas comparações entre os valores numéricos e experimentais, uma vez que a ocupação de um dos

lugares da sala não tem a mesma representatividade quando mais da metade dos lugares da sala estão ocupados. Recomenda-se que pelo menos 50% dos lugares sejam ocupados quando da medição dita com audiência, pois dessa forma, a inserção da platéia promove diferenças perceptíveis em qualquer parâmetro analisado. Os resultados obtidos para as configurações descritas na Figura 5.8 são mostrados a seguir (ver Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Valores experimentais dos parâmetros acústicos da sala com e sem audiência.

Frequência (Hz)	SEM AUDIÊNCIA				COM AUDIÊNCIA			
	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI
125	1,70	1,94	0,37	0,44 a 0,48	1,73	1,61	0,35	0,54 a 0,58
250	1,60	1,87	0,35		1,40	1,47	0,42	
500	1,69	2,06	0,27		1,07	1,34	0,40	
1000	1,58	1,99	0,28		0,94	1,17	0,43	
2000	1,36	1,69	0,37		0,80	0,97	0,50	
4000	1,14	1,34	0,44		0,71	0,85	0,57	
8000	0,78	0,85	0,59		0,62	0,60	0,69	

5.4 ANÁLISE NUMÉRICA

A referida sala foi representada por modelos geométricos, criados na plataforma CAD, e convertidos para o formato (.dxf) para possibilitar a importação para o *software* ODEON. Para cada superfície é atribuído um valor de coeficiente de absorção sonora e, opcionalmente, um valor de coeficiente de espalhamento, condizente com suas características reais. A potência sonora e o tipo de fonte também são inseridos no modelo, para que a representação do ambiente real, através do modelo numérico, seja a mais semelhante possível.

Por se tratar de um ambiente de volume relativamente pequeno (135,97 m³), todo objeto a ser inserido no modelo tinha de possuir geometria representativa à sua geometria real, para se obter maior precisão nos resultados. Por outro lado, os objetos não podiam ser muito detalhados para que isso não refletisse em elevado tempo de processamento ou mesmo a não execução de uma simulação, sendo necessário simplificar o modelo, tal como sugerido na metodologia do *software* utilizado.

Devido às limitações, tanto dos métodos de cálculo de um modelo numérico quanto da determinação de alguns dados de entrada, a validação desses modelos, geralmente, é feita através de ensaios experimentais, levando-se em consideração, primeiramente, o ambiente sem audiência, pois dessa forma, o número de elementos é menor, e os elementos de maior complexidade (audiência) ainda não estão presentes, o que facilita a validação.

O processo de validação de um modelo consiste em comparar os resultados obtidos experimentalmente com os dados fornecidos, através de simulações, em seu respectivo

modelo numérico. No caso aqui trabalhado, foram realizadas simulações com e sem audiência na sala em estudo, inicialmente sem a presença dos painéis de sisal - FP, no intuito de se obter o tempo de reverberação da sala, de tal forma que estes resultados pudessem ser comparados com resultados experimentais, obtidos sob as mesmas condições e assim validassem o modelo numérico. A representação da sala, através de seu respectivo modelo geométrico, é mostrada a seguir (ver Figura 5.9) em vista superior, em ambiente computacional, na qual os detalhes em vermelho representam as posições da fonte sonora durante as medições. Este mesmo modelo é apresentado na Figura 5.10a, com as características de cada superfície associadas a um coeficiente de absorção condizente com suas características reais (ver Figura 5.10b). O processo de simulação detalhado, no qual são inseridas as características de absorção de cada superfície assim como suas respectivas áreas, número de raios utilizados nas simulações, potência sonora da fonte, entre outros detalhes, pode ser visto no ANEXO 1 – SIMULANDO NO ODEON 9.2 Combined, deste trabalho.

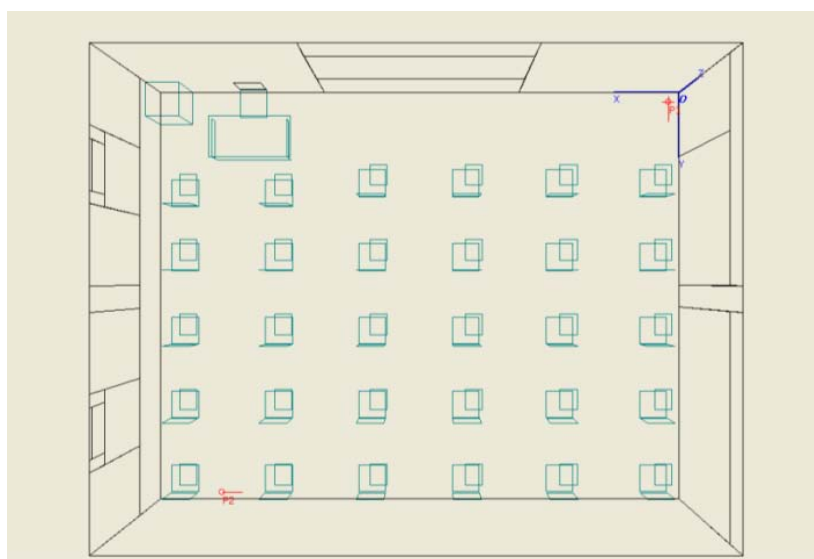


Figura 5.9 - Vista superior do modelo geométrico da sala, apresentado em ambiente computacional.

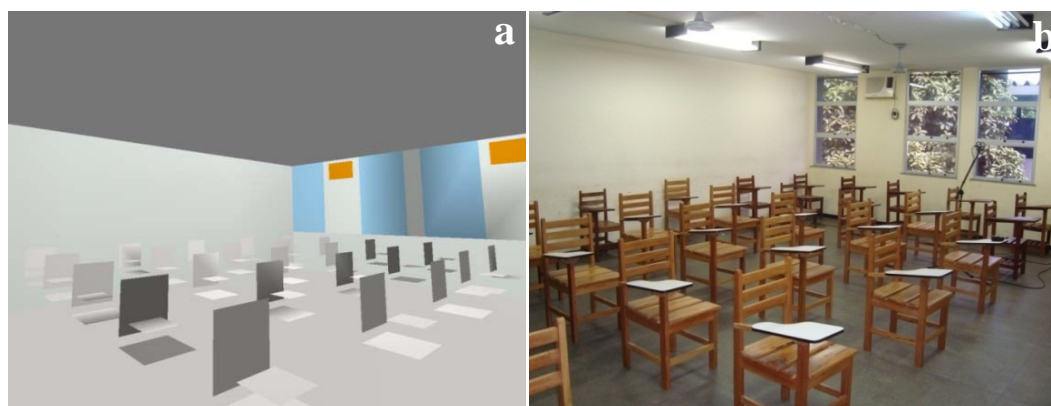


Figura 5.10 - (a) Modelo geométrico da sala e (b) ambiente real.

A curva de calibração (validação) do modelo numérico a partir dos resultados experimentais, levando-se em consideração o tempo de reverberação da sala sem audiência, é apresentada a seguir na forma de gráfico (ver Figura 5.11).

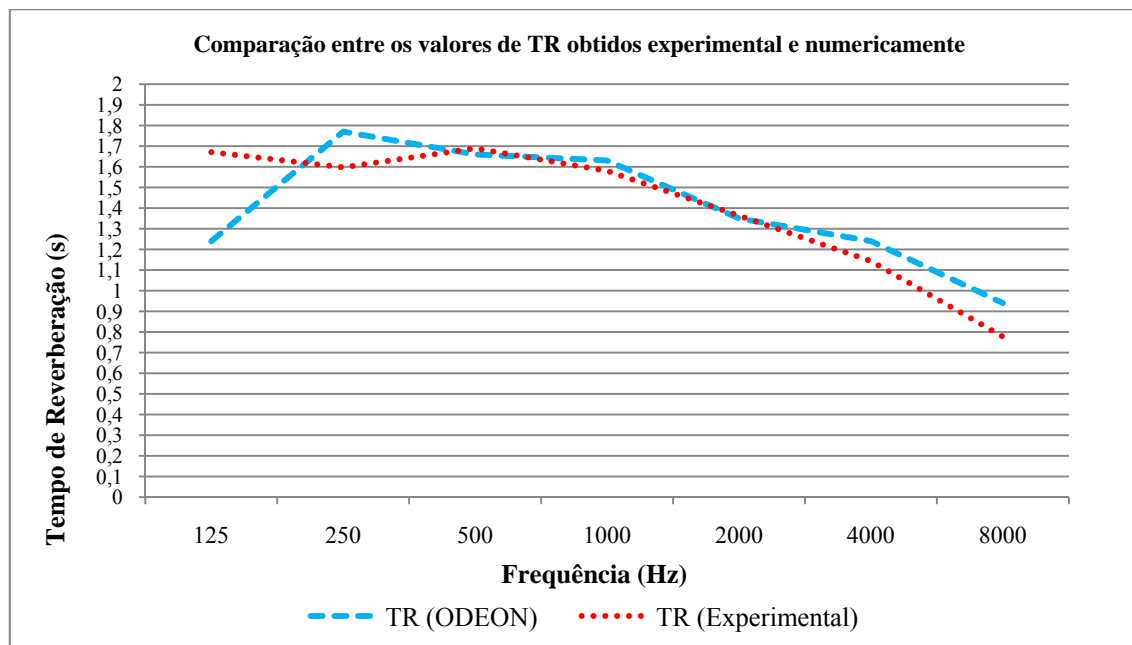


Figura 5.11 - Comparação dos resultados experimental e numérico obtidos para o Tempo de Reverberação da sala sem audiência.

Nota-se, a partir do gráfico mostrado na Figura 5.11, que as maiores divergências entre as medições experimentais e os valores obtidos pelas simulações, estão nas mais baixas frequências do espectro (abaixo de 500 Hz), pois o método de cálculo utilizado pelo *software* de simulação é uma combinação de métodos que fazem analogia do som a raios luminosos, ou seja, parte-se do princípio que os raios acústicos utilizados possuem comprimentos de onda muito pequenos, passando a não reproduzir de forma satisfatória o fenômeno de difração sonora destes em baixas frequências, apresentando assim, maior confiabilidade para médias e altas frequências. Adicionalmente o método experimental de determinação do Tempo de Reverberação também possui limitações, uma vez que se parte do princípio do qual o campo sonoro do ambiente sob teste é difuso, e para as mais baixas frequências é mais complicado haver difusão sonora, haja vista que para um ambiente relativamente pequeno ($135,67 \text{ m}^3$), a resposta em baixa frequência é fortemente modal, como no caso da sala aqui analisada, uma vez que sua frequência de corte – em acústica é a frequência a partir da qual a difusão sonora de um ambiente se dá satisfatoriamente – é de 198,04 Hz.

Dessa forma, as comparações apresentadas a seguir são analisadas para a faixa de frequência de 500 Hz a 8 kHz, que neste caso, corresponde à faixa de médias e altas

frequências, e para esta faixa a confiabilidade dos resultados é garantida. A denominação de baixas, médias e altas frequências depende do ambiente em que esteja sendo analisado. Por exemplo, em um ambiente de elevado volume, a faixa de frequência que pode ser analisada é maior, portanto, uma análise considerando esse ambiente na frequência de 2 kHz, pode ser considerada uma análise em baixa e, no máximo, em média frequência; já no ambiente analisado neste trabalho (Sala DP-11) uma análise nessa frequência corresponderia à uma análise em média ou alta frequência.

Calibrado o modelo numérico, é apresentada a seguir a configuração da sala com audiência (ver Figura 5.12a) e seu respectivo modelo numérico (ver Figura 5.12b). Os resultados obtidos experimentalmente e numericamente para esta configuração são apresentados através de um gráfico comparativo (ver Figura 5.13).

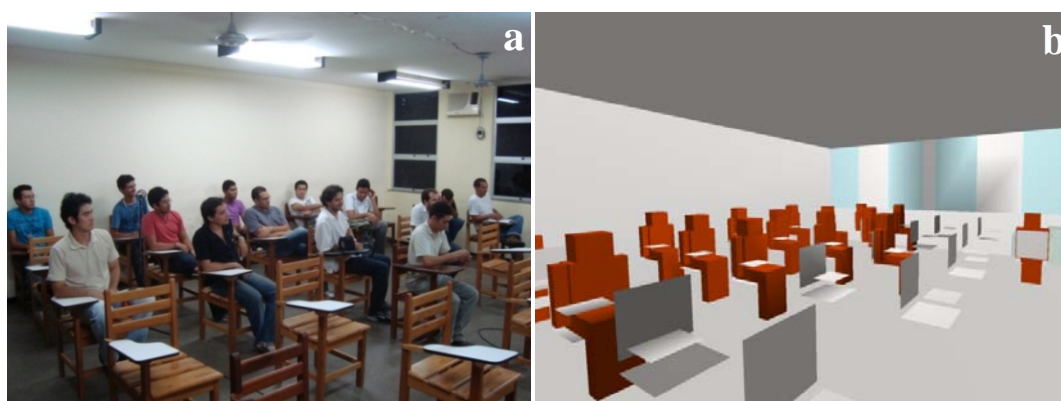


Figura 5.12 - (a) Sala com audiência e (b) seu respectivo modelo numérico.

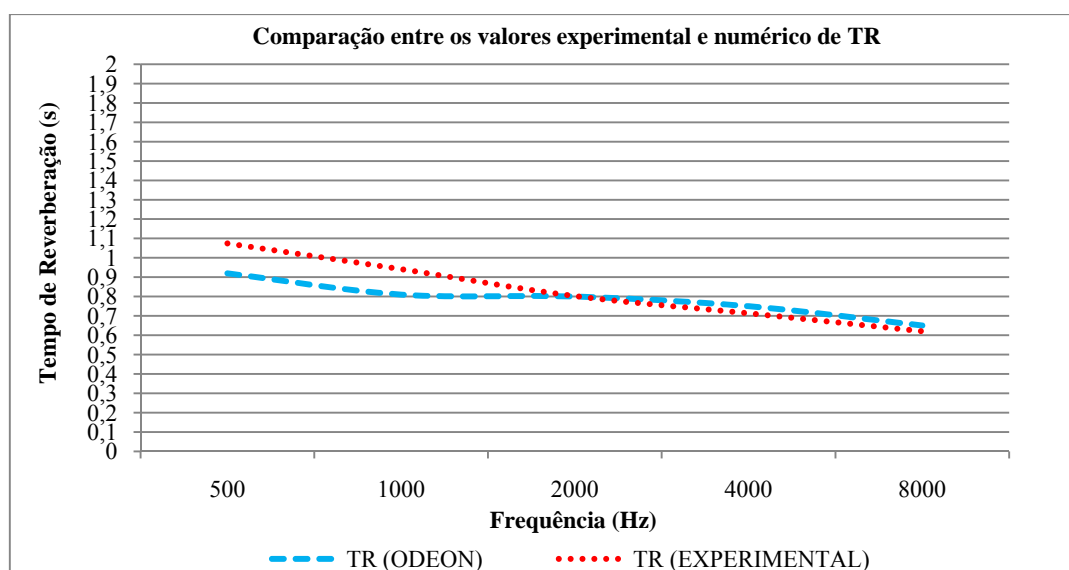


Figura 5.13 - Gráfico comparativo dos resultados experimental e numérico obtidos para o Tempo de Reverberação da sala com audiência.

A partir das comparações apresentadas na Figura 5.13, nas quais o modelo numérico foi capaz de produzir resultados que apresentaram boa concordância com as medições, considerou-se validado o referido modelo numérico. Em outras palavras, o mesmo está apto para a realização de simulações mais complexas (com audiências variadas e materiais de revestimento diversos). Antes de serem propostos tratamentos acústicos para a sala em estudo, no intuito de verificar as mudanças nos parâmetros acústicos analisados, será mostrada a influência que a colocação de uma área equivalente de 4,45 m² de painéis de fibras de sisal - FP na parede do fundo da sala (ver Figura 5.14) promove no Tempo de Reverberação (TR) da sala (ver Figura 5.15) e em outros parâmetros acústicos (ver Tabela 5.2).



Figura 5.14 - Painéis de sisal (4,45 m² de área) colocados na parede do fundo da sala.

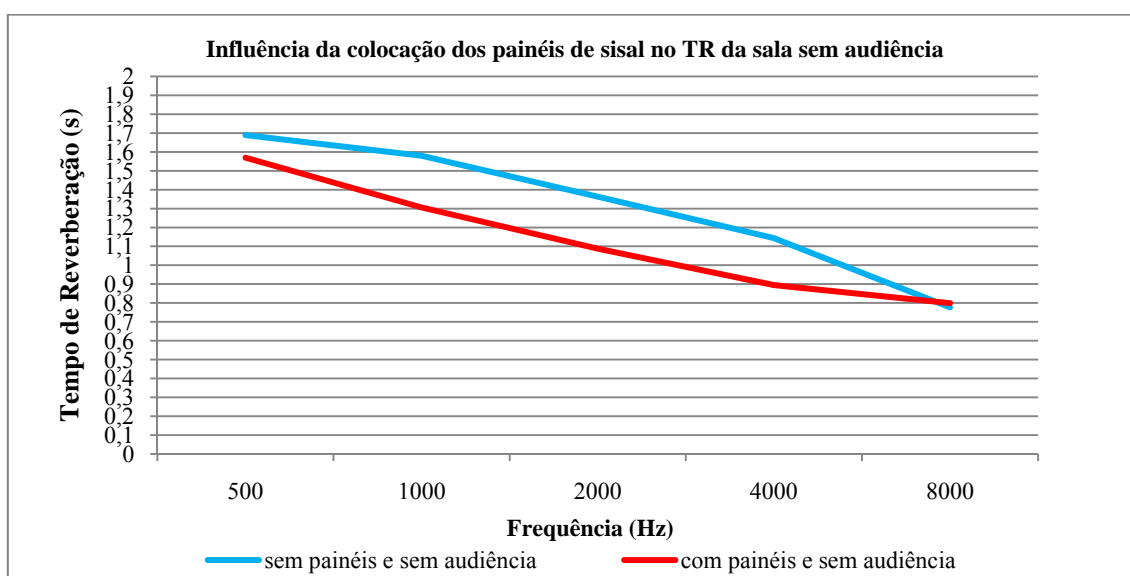


Figura 5.15 - Diferença promovida no Tempo de Reverberação da sala sem audiência devido à colocação dos painéis de fibras de sisal (4,45 m²) na parede do fundo.

Nota-se que, mesmo sendo pequena (cerca de 26% da área da parede do fundo), a área ocupada pelos painéis promove diferenças significativas em alguns parâmetros analisados, como pode ser visto na Tabela 5.2. No caso do parâmetro *RaSTI*, este passa de quase razoável, sem a presença dos painéis na sala, para razoavelmente bom, com a presença destes. Porém, as melhorias obtidas nos parâmetros ainda estão distantes dos valores recomendados, anteriormente mencionados, para a finalidade do ambiente analisado, sendo necessário propor um tratamento acústico.

Tabela 5.2 - Valores experimentais dos parâmetros acústicos da sala sem audiência, com e sem painéis.

Frequência (Hz)	SEM PAINÉIS E SEM AUDIÊNCIA				COM PAINÉIS E SEM AUDIÊNCIA			
	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI
500	1,69	2,06	0,27	0,44 a 0,48	1,07	1,34	0,40	0,54 a 0,58
1000	1,58	1,97	0,28		0,94	1,20	0,43	
2000	1,36	1,70	0,37		0,80	1,00	0,50	
4000	1,14	1,34	0,44		0,71	0,85	0,57	
8000	0,78	0,85	0,59		0,62	0,60	0,69	

Anteriormente à execução de um tratamento acústico, determina-se o material de revestimento interno a ser utilizado e sua quantidade certa, de acordo com suas características de absorção sonora. O posicionamento do material é definido levando-se em consideração as reflexões que devem ser minimizadas (ou eliminadas) sem que a audiência na parte mais extrema da sala (última fila de cadeiras) fique prejudicada, quando de um som vindo da parte frontal (oposta) da sala (proveniente de um orador).

Assumindo-se que o orador fica a maior parte do tempo de duração das aulas, afastado de um metro do quadro, determinou-se o caminho das ondas sonoras na sala em estudo, através do Método da Fonte Imagem Especular (ver Figura 5.16), visando-se obter uma configuração eficiente para nela se executar um tratamento acústico. A distribuição sonora da sala após a execução do tratamento acústico hipotético é mostrada na Figura 5.17.

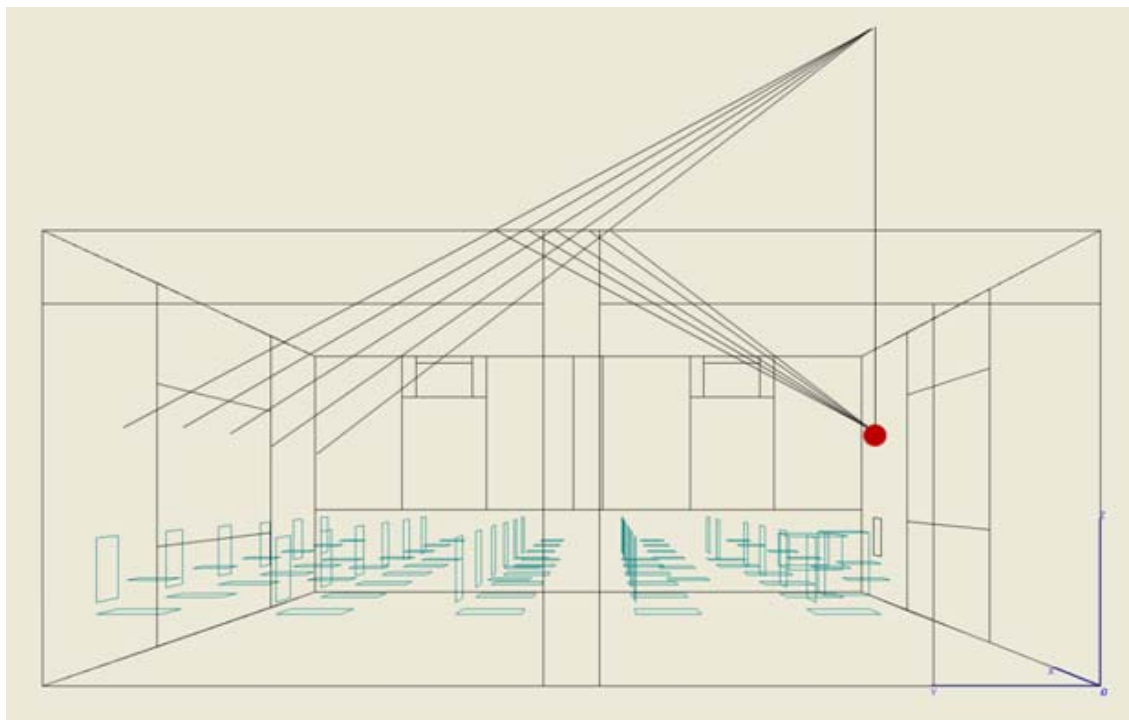


Figura 5.16 - Determinação do caminho das ondas sonoras utilizando o Método da Fonte Imagem Espelar.

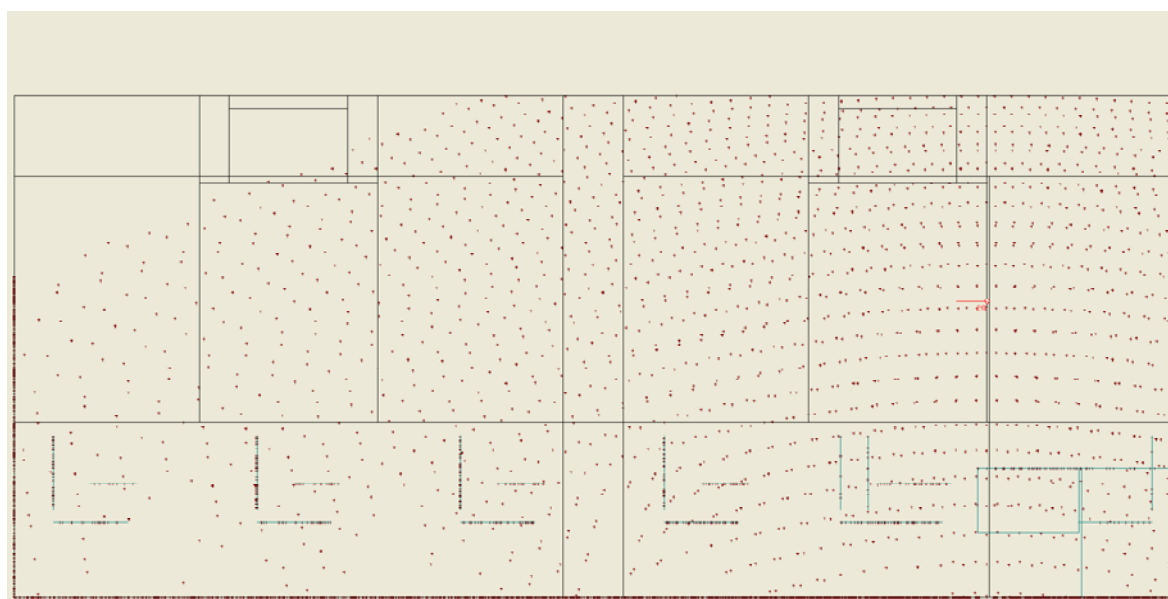


Figura 5.17 - Distribuição sonora da sala eliminando as reflexões provenientes da parede do fundo e parte do teto, após a determinação do caminho das ondas sonoras através do Método da Fonte Imagem Espelar.

De acordo com a Figura 5.16, através de um tratamento hipotético, em que a parede do fundo da sala e uma parte do teto (2,46 m a partir da parede do fundo) podem ser preenchidas com material de revestimento, faz com que os ouvintes mais afastados não

fiquem prejudicados, uma vez que o restante das superfícies da sala promove um reforço do som direto através de reflexões, sem privilegiar ou prejudicar um ouvinte específico. Como resultado desse tratamento tem-se a distribuição sonora da sala, mostrada na Figura 5.17, na qual os pontos vermelhos representam frentes de onda e assim, pode-se ter idéia do comportamento da sala após a implementação das modificações propostas.

São propostos então, tratamentos acústicos da sala em questão, utilizando-se painéis de fibra de sisal – FP, placas acústicas SONEX FLEXONIC - 75 mm e painéis de fibra de açai, baseando-se no caminho das ondas sonoras mostrado na Figura 5.16 e realizando-se simulações com esses materiais, inicialmente sem audiência (ver Figura 5.18) e, em seguida, com a capacidade total de alunos utilizando-se somente os referidos painéis de sisal como material de revestimento (ver Figura 5.19), verificando de que forma os parâmetros acústicos variam, quando da alteração do material utilizado no tratamento e quando da presença da audiência máxima em sala de aula.

Os resultados esperados para as situações sem audiência podem ser vistos na Tabela 5.3, enquanto que os resultados obtidos para a situação com audiência podem ser vistos na Tabela 5.4. Eventualmente poderiam ser feitas outras simulações (tratamentos acústicos hipotéticos), levando-se em consideração diferentes partes da sala a serem tratadas, utilizando-se materiais de revestimento diversos. No entanto, foi utilizada a solução de maior eficiência quando da utilização da quantidade certa e localização correta da colocação do material de revestimento.

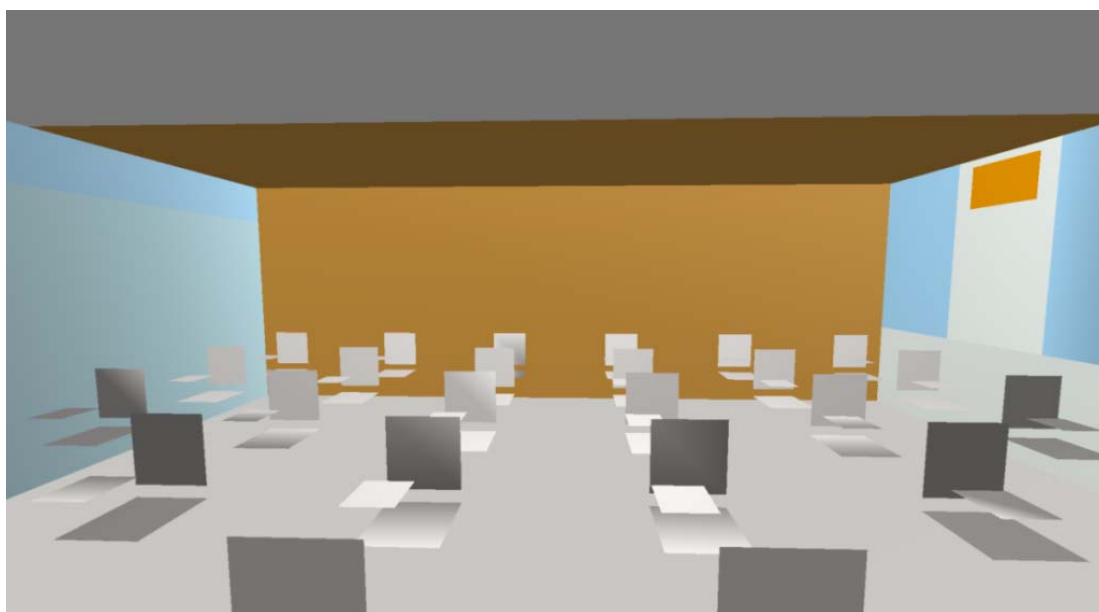


Figura 5.18 - Sala com tratamento acústico proposto.

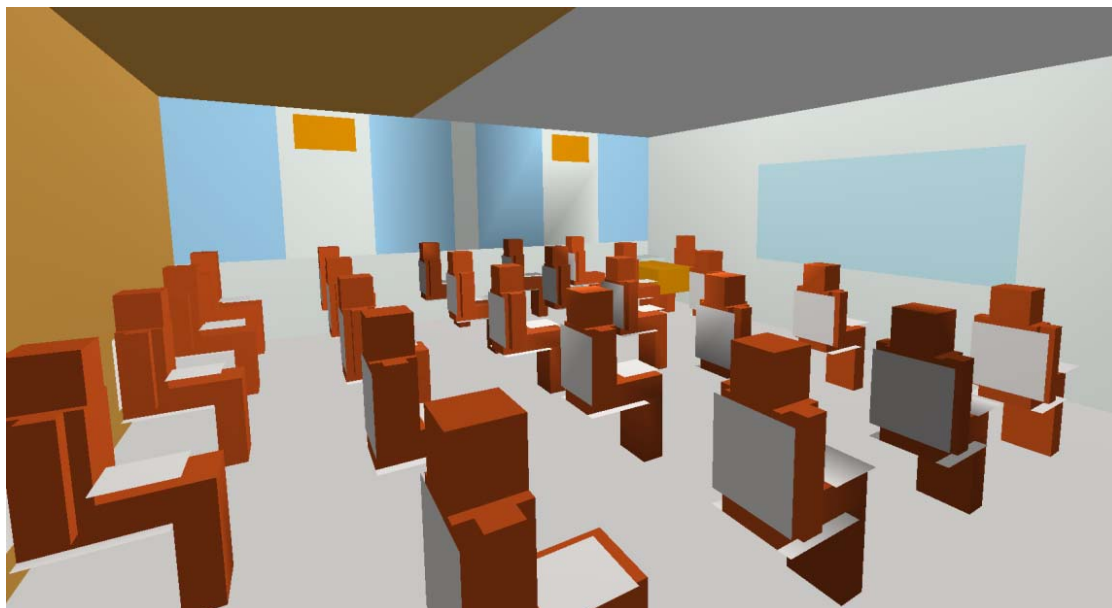


Figura 5.19 - Sala com tratamento acústico proposto anteriormente e com a capacidade total de alunos na sala.

Tabela 5.3 - Valores esperados para os parâmetros acústicos da sala sem audiência e com tratamentos acústicos diversos.

Frequência (Hz)	TRATAMENTO ACÚSTICO PROPOSTO											
	SONEX FLEXONIC (75 mm)				PAINÉIS DE AÇAÍ (30 mm)				PAINÉIS DE SISAL (20 mm)			
	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI	T ₃₀ (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI
500	0,60	0,56	0,76	0,71 a 0,73	0,74	0,70	0,67	0,71 a 0,73	1,01	1,00	0,53	0,66 a 0,68
1000	0,58	0,47	0,82		0,59	0,50	0,80		0,74	0,74	0,65	
2000	0,53	0,43	0,84		0,55	0,48	0,81		0,59	0,51	0,79	
4000	0,51	0,41	0,85		0,49	0,44	0,83		0,54	0,47	0,82	
8000	0,42	0,37	0,88		0,43	0,38	0,87		0,51	0,49	0,80	

O comparativo realizado baseou-se na utilização de um material comercialmente disponível bastante conhecido no mercado (SONEX FLEXONIC – 75 mm), além dos painéis desenvolvidos, como os painéis de sisal - FP, pois foram medidos nas câmaras reverberantes da UFPA e da UFSM, e o painel de açaí, o qual apresentou, possivelmente, os melhores resultados de absorção sonora, uma vez que os valores comparados, das medições na minicâmara e na câmara padronizada, mostraram-se muito próximos, validando os resultados da minicâmara.

Tabela 5.4 - Valores esperados para os parâmetros acústicos da sala com audiência máxima e com tratamento acústico com painéis de fibras de sisal.

Frequência (Hz)	TRATAMENTO ACÚSTICO (PAINÉIS DE SISAL) E AUDIÊNCIA MÁXIMA			
	T ₃₀ (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI
500	0,50	0,48	0,79	0,75 a 0,78
1000	0,44	0,40	0,85	
2000	0,41	0,33	0,90	
4000	0,39	0,32	0,90	
8000	0,35	0,33	0,90	

Nota-se as que os tratamentos acústicos propostos promovem melhorias consideráveis em todos os parâmetros analisados como no caso do Tempo de Reverberação, porém, o efeito combinado do tratamento com a audiência tornaram os valores dos parâmetros acústicos próximos dos valores ideais para a finalidade do ambiente. A determinação dos parâmetros acústicos de um ambiente com a presença de audiência é importante no sentido de analisar o comportamento da sala em uma condição semelhante à sua real utilização, não fazendo sentido se preocupar com a qualidade acústica de um ambiente se este não for frequentado por pessoas. Porém, a influência da audiência deve ser mínima, de forma que para situações bem distintas (ora a sala cheia, ora com poucas pessoas) o comportamento da sala seja praticamente o mesmo.

Comparando-se os valores do Tempo de Reverberação da sala sem audiência, com e sem o tratamento acústico, utilizando-se como material de revestimento, painéis de sisal - FP, as reduções obtidas para as frequências de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz foram de 19%, 34% e 41%, respectivamente, e o parâmetro responsável pela inteligibilidade (*RaSTI*) aumentou de 0,46 a 0,67, em média, melhorando assim, consideravelmente a qualidade acústica da sala em estudo. As frequências de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz tem grande importância no que diz respeito à inteligibilidade por dois motivos principais, o primeiro é porque a frequência da fala humana encontra-se justamente neste intervalo, ou seja, tempos de reverberação elevados nessas frequências, dificultam o entendimento das palavras e conseqüentemente a comunicação verbal; o segundo é porque essas frequências tem um peso maior quando da determinação do índice de inteligibilidade de forma analítica.

Avaliando-se os resultados obtidos através das simulações numéricas, pode-se dizer que os resultados obtidos para os painéis de fibra de sisal foram semelhantes aos resultados obtidos para os materiais comercialmente disponíveis, com a vantagem de serem, menos custosos, provenientes de fontes renováveis e agregarem valor às fibras naturais. Confirmando, portanto, o bom desempenho acústico dos painéis aqui desenvolvidos quando

de sua utilização em aplicações semelhantes às reais como em um revestimento interno de um ambiente.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal: desenvolver e caracterizar acusticamente painéis confeccionados a partir de fibras vegetais (açai, coco, dendê e sisal) na forma de painéis mesclados, unifibra e multifibras.

Em relação aos painéis de fibras vegetais, apesar de sua produção ser, relativamente, em grande escala, estes não são considerados materiais acústicos convencionais, pois são concebidos para outros fins e utilizados para controle de ruído em ambientes fechados sem que suas características acústicas sejam apresentadas pelo fabricante. Dessa forma, o desempenho acústico destes painéis fica em segundo plano, sendo potencializado, através de alterações em alguns parâmetros intrínsecos ao processo produtivo sem que este fosse o real propósito.

Levando-se em consideração a diversidade de fibras naturais existentes no Brasil e suas características, pode-se afirmar que há um grande potencial, ainda inexplorado, para o desenvolvimento de novos materiais absorventes sonoros que, se utilizado adequadamente, pode melhorar as características dos materiais já existentes ou ainda substituí-los por novos e melhores materiais.

Em relação à fabricação dos primeiros painéis, estes serviram para estabelecer os parâmetros mais relevantes, utilizados como referência de padronização na fabricação de novos painéis. Parâmetros, como a quantidade de fibra por painel, a quantidade de fibra por camada, quantidade de aglomerante utilizado, pressão de prensagem, tempo de prensagem, etc., influenciam, potencialmente, as propriedades físicas e mecânicas, além das propriedades acústicas dos referidos painéis.

Os painéis de fibras vegetais fabricados neste trabalho apresentaram boa agregação e bom aspecto visual, devido ao êxito do processo desenvolvido para elaborá-los, porém, até que sejam utilizados como materiais acústicos devem passar por ensaios que atestem sua aptidão ao uso. Aptidão esta, comprovada através de ensaios experimentais e caracterização acústica, haja vista seu bom desempenho.

Pelo fato do trabalho possuir como um dos objetivos a fabricação de painéis de forma artesanal, uma vez que o maquinário para fabricação destes ainda não foi completamente desenvolvido, pode-se afirmar que, caso este processo seja otimizado e automatizado, é de se esperar que suas características (acústicas, físicas, etc.) sejam melhoradas.

Em relação ao potencial acústico, todos os painéis fabricados mostraram-se bons absorvedores sonoros uma vez que apresentaram desempenho compatível e, em alguns casos, superior ao dos materiais comercialmente disponíveis. Além disso, não foram levadas em consideração a espessura e a densidade dos painéis nas comparações de desempenho, algo que evidenciaria o desempenho superior dos painéis artesanais frente aos materiais convencionais.

Vale ressaltar que muitas combinações de fibras não foram ensaiadas e sequer concebidas, pois, manipulando-se determinados parâmetros como a proporção de fibras em um painel mesclado ou utilizando-se três ou mais fibras na composição de um painel multifibra (haja vista que para as combinações aqui feitas, tanto para painéis mesclados quanto para painéis multifibras, foram utilizadas apenas duas fibras), as combinações são numerosas, podendo surgir um material com características ainda melhores que as características dos materiais desenvolvidos neste trabalho.

Em relação ao coeficiente de absorção sonora dos materiais ensaiados, as análises feitas buscaram estabelecer uma comparação qualitativa entre os materiais investigados, testando-os no mesmo ambiente, sob as mesmas condições, isto é, aqueles materiais que apresentarem bom desempenho na minicâmara, certamente apresentarão bom desempenho em câmaras reverberantes reais. Assim, os painéis de fibras vegetais analisados podem ser utilizados como materiais acústicos uma vez que apresentaram bom desempenho nos ensaios experimentais e suas propriedades acústicas foram determinadas e são satisfatórias.

Conhecer as propriedades acústicas de materiais é muito útil para a predição do comportamento acústico de um ambiente, uma vez que se utilizando determinados *softwares* de simulação, para reproduzir a condição real através de um modelo numérico, é possível conseguir boa precisão e eficiência nos resultados para configurações diversas (ambientes com e sem audiência, materiais de revestimento diversos, etc.), tornando possível o *design* do campo sonoro desejado para o ambiente, em função de sua finalidade.

Os tratamentos acústicos propostos, utilizando-se tanto materiais acústicos convencionais quanto painéis artesanais de fibras vegetais (painéis de sisal e açaí), promoveram melhorias significativas em todos os parâmetros analisados, destacando-se o fato

de que o efeito combinado do tratamento com a audiência tornaram os valores dos parâmetros acústicos próximos dos valores ideais para a finalidade do ambiente.

A audiência em uma sala é importante no sentido de analisar seu comportamento em uma situação semelhante à sua real utilização, porém, a qualidade acústica da sala deve ser tal, que a influência promovida, quando da presença de audiência, seja mínima, caso contrário, como é um parâmetro que varia com muita frequência, não pode servir de referência para se executar um tratamento acústico, pois para cada configuração diferente de audiência a solução proposta também será diferente.

A inteligibilidade em um ambiente é um dos principais parâmetros para avaliar sua qualidade acústica, porém, outros parâmetros tem grande importância (Relação Sinal/Ruído, Tempo de Decaimento Inicial, entre outros), pois servem como indicadores de outras características, o que torna sua avaliação mais completa já que se relacionam entre si, ou seja, a inteligibilidade de um ambiente está associada com parâmetros como o Tempo de Reverberação, com a Relação Sinal/Ruído, com o Tempo de Decaimento Inicial, entre outros.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As recomendações feitas neste trabalho são:

Verificar a possibilidade de se utilizar outras fibras naturais para a fabricação de painéis acústicos que não as fibras aqui utilizadas (coco, sisal, dendê e açaí) tais como juta, curauá, rami, piaçava, entre outras, assim como desenvolver novas metodologias para a concepção dos painéis e testar novos aglomerantes. No caso de painéis mesclados, testar diferentes percentuais de massa das fibras que constituem os painéis. No caso de painéis multifibras, utilizar três ou mais fibras em sua composição.

Ensaia os painéis fabricados em diferentes dispositivos acústicos, como portas acústicas, silenciadores resistivos, no intuito de ampliar as aplicações desses materiais, bem como ensaiá-los em câmaras reverberantes de tamanho real, verificando a concordância com os resultados obtidos através da minicâmara utilizada neste trabalho.

Realizar um planejamento fatorial objetivando identificar quais parâmetros contribuem de forma mais efetiva para a modificação da propriedade de absorção sonora dos painéis. Isto é importante, pois ao se realizar um tratamento estatístico tem-se, como consequência, uma maior confiabilidade nos resultados.

Levantar outras propriedades físico-acústicas para os materiais desenvolvidos como Porosidade, Fator estrutural (Tortuosidade), Resistividade ao fluxo, entre outras.

REFERÊNCIAS

ALLARD, J. F. *Rayleigh waves in air saturated axisymmetrical soft porous media. Journal of Applied Physics* vol. 106, paper 014906, 2009.

ALLARD, J. F.; CASTAGNÈDE, B.; HENRY, M. *Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air. Review of Scientific Instruments*, vol. 65, nº 3, pp. 754-755, 1994.

ANDRADE, Stella Maris Melazzi. *Metodologia para avaliação de impacto ambiental sonoro da construção civil no meio urbano*. 2004. 202 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ANSI STANDARD 12.60 – *Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools*, 2002.

AOCS - AMERICAN OIL CHEMISTS SOCIETY. *Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society*, 5th ed. Washington, 2001.

ARAÚJO, Marco Antônio Nabuco de. *Investigation on the parameters involved in measuring sound absorption in reverberant chambers: critical review of the standard*. D.Sc. Thesis, Federal University of Rio de Janeiro. COPPE, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT: Banco veicular em fibra de coco, 1996.

BASTOS, Leopoldo Pacheco. *Controle de Ruído em instalações de grupos geradores: um estudo de caso*. 2007. 114 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

BASTOS, Leopoldo Pacheco. et al. *Development and acoustic characterization of panels manufactured from vegetable fibers*. IN: 20TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING. ANAIS, 2009.

BELTRÃO, Napoleão Esberard de Macêdo (Org.). *O agronegócio do sisal no Brasil*. EMBRAPA, 1999.

BERTOLI, S. R. *Avaliação do conforto acústico de prédios escolares da rede pública: o caso de Campinas*. In: II ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2001, Águas de São Pedro. Anais do ENCAC 2001, 2001.

BIOT, Maurice Anthony. *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. II. Higher frequency range. Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*, vol. 28, nº 2, p. 168 – 191, 1956.

BISMARCK, A. et al. *Surface Characterization of natural fibers: surface properties and the water up-take behavior of modified sisal and coir fibers. Green Chemistry*. 2001, v.3, PP 100-107.

BISTAFA, Sylvio Reynaldo. *Acústica Arquitetônica: Qualidade Sonora em salas de Audição Crítica - descrição detalhada*. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2003.

BISTAFA, Sylvio R. *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*. São Paulo - SP: Editora Edgar Blücher, 2006.

BOLTON, J. S.; KANG, Y. J. *Elastic porous materials for sound absorption and transmission control*. In: PROCEEDINGS OF THE 1997 NOISE AND VIBRATION CONFERENCE, SAE Paper 971878, p. 77-91, 1997.

BRACCESI, Claudio; BRACCIALI, Andrea. *Least Squares Estimation of Main Properties of Sound Absorbing Materials through Acoustical Measurements. Applied Acoustics* vol. 54, nº1, pp 59 – 70, 1998.

BRENNAN, M. J.; TO, W. M., 2001. *Acoustic properties of rigid frame porous materials: an engineering perspective. Applied Acoustics* vol. 62, pp. 793 – 811, 2001.

CAMILO, T. S.; TENEBBAUM, R. A.; COELHO, J. L. Bento. *Engenharia acústica auxiliada por computador: um método híbrido para simulação de acústica de salas*. IN: I SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 2002, Belo Horizonte. Anais do I Seminário de Engenharia de Áudio. Belo Horizonte, 2002. v. CD. p. 1-8.

CARNESECA, Luiz Fernando Hortelani. *Métodos de Predição e Análise de Ruído em Unidades Offshore*. 2006. 89 f. Dissertação de Mestrado, Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

CASTAGNÈDE, Bernard et al. *Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials. Applied Acoustics* vol.61, pp. 173 – 182, 2000.

CEDERBAUM, Gabriel; LI, Leping; SCHULGASSER, Kalman. *Poroelastic structures*. Editora Elsevier Science, Holanda, 2000.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 75200: *Determination of burning behavior of interior materials in motor vehicles*, 1980.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 53579: *Testing of flexible cellular materials - Indentation test on finished parts*, 1987.

FELLAH, Z. E. A. et al. *Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via reflected waves at oblique incidence. Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*, vol. 113, nº 5, 2003.

FIGUEIREDO, Fábio Leão. et al. Análise de parâmetros acústicos subjetivos: critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música. IN: 4ª REUNION ANUAL DE LA SOCIEDAD ARGENTINA PARA LAS CIENCIAS COGNITIVAS DE LA MÚSICA. ANAIS. Instituto Superior de Música – Universidad Nacional de Tucumán, 2004.

FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARDS. FMVSS 302: *Flammability of Interior Materials*, 1999.

GERGES, Samir N. Y.; BALVEDI, Alessandro M. *Numerical simulation and experimental tests of multilayer systems with porous materials. Applied Acoustics* vol. 58, pp. 403 – 418, 1999.

GERGES, Samir N. Y. *Ruído: Fundamentos e Controle*. 2. ed. Florianópolis. NR Editora, 2000.

GUEDES, Reginaldo Cascaes. *Projeto e construção de uma câmara reverberante em escala reduzida para a caracterização acústica de materiais absorventes*. 2007. 94 f. Dissertação de Mestrado, 1º versão, Setor de Ciências Exatas, Vibrações e Acústica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

HOROSHENKOV, K. V.; SWIFT, M. J. *The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*, vol. 110, nº 5, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 354: *Measurements of sound absorption in a reverberation room*, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3382: *Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3795: *Road vehicles - Determination of burning behavior of interior materials for motor vehicles*, 1976.

JAMBROSIC, K.; HORVAT, M.; DROMITROVIC, H. *Reverberation Time Measuring Methods*. IN: PROCEEDINGS ACOUSTICS'08, 2008, Paris.

JAOUEN, Luc; RENAULT, Amélie; DEVERGE, Mickael. *Elastic and damping characterizations of acoustical porous materials: available experimental methods and applications to a melamine foam*. *Applied Acoustics* vol. 69, pp. 1129 – 1140, 2008.

JOSEPH, K.; THOMAS, S.; PAVITHRAN, C. Effect of ageing in the physical and mechanical properties of sisal-fiber reinforced polyethylene composites. *Composites Science and Technology*, Barking, v.53, p.99-110, 1995.

KAPULSKIS, T. A.; DE JESUS, R. C.; MEI, L. H. I. *Modificação química de fibras de coco e de sisal visando melhorar suas interações interfaciais com matrizes poliméricas biodegradáveis*. UNICAMP – SP, 2005.

LIMA, Paulo R. L. et al. *Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, 2007.

LOPES, Leonardo Ferreira. *Uso de materiais porosos em filtros acústicos*. 2006. 110 f. Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências Exatas, Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MAFRA, Márcio Paulo de Araújo. *Desenvolvimento de infra-estrutura para caracterização e análise de painéis acústicos*. 2004. 135 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.

MANO, Eloisa Biasotto. *Polímeros como materiais de engenharia*. 3ª reimpressão. São Paulo – SP: Editora Edgar Blücher, 2003.

MARROQUIM, S. *Uso da fibra de coco e látex na engenharia automotiva: memorial da Crina-Látex do Brasil*. Abreu e Lima: ABRACOCO, 1994.

MARTINS, G. S. et al. *Caracterização mecânica e térmica de compósitos de poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal*. *Polímeros*, São Carlos, v. 04, n. 05, p. 326-333, 2004.

MARTINS, Maria Alice; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli. *Short sisal fiber-reinforced tire rubber composites: Dynamic and mechanical properties*. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 91, p. 670-677, 2004.

MARTINS, Maria Alice; MATTOSO, Luis Henrique Capparelli; PESSOA, José Dalton Cruz. *Comportamento Térmico da fibra do açaí*. EMBRAPA-SP, 2005.

MASIERO, Bruno Sanches; IAZZETTA, Fernando. *Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva*. In: I SEMINÁRIO MÚSICA CIÊNCIA TECNOLOGIA: ACÚSTICA MUSICAL, 2004, São Paulo.

MATEUS, Diogo et al. *Avaliação dos parâmetros de qualidade sonora nas capelas da reconciliação no edifício da nova igreja do santuário de Fátima*. In: ACÚSTICA 2008, Universidade de Coimbra, Portugal, 2008.

MATTOSO, Luis Henrique Capparelli et al. *Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos*. São Carlos: EMBRAPA – CNPA, 1996. Projeto Embrapa Nº 3.

MEDEIROS, Eduardo Bauzer. *Introdução à teoria acústica*. IN: I SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 2002, Belo Horizonte. Anais do I Seminário de Engenharia de Áudio. Belo Horizonte, 2002. Versão do CD.

MELO, V.S.G. et al. *Aperfeiçoamento do software RAIOS para simulação numérica de acústica de salas com inclusão de modelo modal para baixas frequências*. REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA (SOBRAC) nº 38, 2007.

MORASSI, J.O. *Fibras naturais: aspectos gerais e aplicação na indústria automobilística*. Mercedes Benz do Brazil, 1994 p.1259-1262.

NBR 10151:2000 - *Avaliação do nível do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade*. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR 10152:1987. *Níveis de ruído para conforto acústico*. Rio de Janeiro, Brasil.

NEIRA, Dorivalda Santos Medeiros. *Fibras de sisal (Agave Sisalana) como isolante térmico de tubulações*. 2005. 80 f. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

NR6: 1992 - *Equipamento de proteção individual – EPI.*

NR7:1978 - *Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional – PCMSO.*

NR15:1978 - *Atividades e Operações Insalubres.*

NR17:1977 - *Ergonomia.*

NUNES, Alexandre. *Análise modal teórica e experimental acústica de cavidades com absorção sonora.* 2001. 124 f. Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências Exatas, Mecânica Computacional, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

ODEON. *User Manual - Industrial, Auditorium and Combined Editions: Auditorium acoustics, Sound reinforcement and Noise control in industrial halls,* 2008.

OLIVEIRA, Ethel Caires de; TEODORO, Elias Bitencourt. *Métodos para medição do coeficiente de absorção sonora.* In: 15º POSMEC - SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2005.

PARKINSONA, J. P.; PEARSEA, J. R.; LATIMER, M. D. *Sound absorption of elastic framed porous materials in combination with impervious films: effect of bonding.* *Applied Acoustics* vol.63, pp. 819 – 828, 2002.

PINTO, R. C. A. et al. *Avaliação da Resistência ao Impacto de Argamassas Reforçadas com Fibras.* IN: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2005, Olinda. Anais do CBC 2005, v. 1. p. 1-14.

RAYNOISE. *Manual - Numerical Integration Technologies.* N. V., 1993.

RITTNER, H. *Óleo de Palma: Processamento e Utilização.* São Paulo, 1996.

SALVADOR, Sofia. *Inovação de produtos tecnológicos em cortiça.* Instituto Superior Técnico - Departamento de Engenharia Mecânica. Lisboa, 2001.

SANTOS, J. L. P. *Estudo do Potencial Tecnológico de Materiais Alternativos em Absorção Sonora.* Santa Maria: editora UFSM, 2005.

SHRAVAGE, P.; BONFIGLIO, P.; POMPOLI, F. *Hybrid Inversion technique for predicting geometrical parameters of porous materials*. IN: PROCEEDINGS ACOUSTICS'08, 2008, Paris.

SILVA, Renato Rodrigues Oliveira da. *Desenvolvimento da cultura do sisal nas regiões semi-áridas do nordeste brasileiro*. Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, 1994. Projeto Embrapa Nº 07094004.

SOUZA, Mauricy Cesar Rodrigues de. *Previsão do ruído em salas por raios acústicos e ensaios experimentais*. 1997. 113 f. Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências Exatas, Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SUGIE, Satoshi; YOSHIMURA, Junichi; OGAWA, Hiromsasa. *Absorption characteristics of fibrous material covered with perforated facing and film*. *Acoustics: Science and Technology* vol. 27, nº 2, 2006.

SUINAGA, Fábio Akiyoshi et al. *Cultivo de Sisal na Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro*. EMBRAPA, Campina Grande – PB, 2006.

TARNOW, Viggo. *Compressibility of air in fibrous materials*. *Journal of the Acoustical Society of America (JASA)* vol. 99, nº 5, 1996.

TENEBAUM, R. A.; CAMILO, T. S. *Método híbrido para simulação numérica de acústica de salas: teoria, implantação computacional e validação experimental*. In: I SEMINÁRIO MÚSICA CIÊNCIA TECNOLOGIA: ACÚSTICA MUSICAL, 2004, São Paulo.

TORO, Marlenne Giovanna Uría. *Avaliação acústica de salas de aula em escolas públicas na cidade de Belém - Pará: uma proposição de projeto acústico*. 2005. 174 f. Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências Exatas, Vibrações e Acústica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

TORREIRA, Raul Peragallo. *Isolamento Térmico*. Fulton Editora Técnica, 1980.

TOUTONGE, José de Aviz. *Projeto e construção de câmaras reverberantes em escala reduzida para o estudo das características de Perda de Transmissão de divisórias confeccionadas a partir de materiais regionais*. 2006. 117 f. Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências Exatas, Vibrações e Acústica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

VALADARES, Victor Mourthé. *Acústica de Salas de Concerto*. In: I SEMINÁRIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 2002.

VARGHESE, S. et al. *Effect of adhesion on the equilibrium swelling of short sisal fiber reinforced natural rubber composites*. Rubber Chemistry and Technology, Akron, v.68, p.01-13, 1994. PA/3, CNPDIA, nov/96, p.4.

VIEIRA, Rodrigo José de Andrade. *Desenvolvimento de painéis confeccionados a partir de fibras de coco para controle acústico de recintos*. 2008. 262 f. Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências Exatas, Vibrações e Acústica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

VIVEIROS, Elvira B. *Acústica de Salas e Técnicas Impulsivas*. In: III ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1995, Gramado. Anais do III Encontro Nacional e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 1995. p. 725-730.

VORLÄNDER, M.; BIETZ, H. *Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time*. Acustica vol. 80. pp. 205 – 215, 1994.

VORONINA, N. *Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material*. Applied Acoustics vol. 48, nº 2, pp. 121 – 132, 1996.

VORONINA, N. *Comparison between theoretical and empirical models for elastic porous materials*. Applied Acoustics vol. 58, pp. 255 – 260, 1999.

WANG, Chao-Nan; TORNG, Jiunn-Hwan. *Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials*. Applied Acoustics vol.62, pp. 447 – 459, 2001.

WANG, Chao-Nan; KUO, Yan-Min; CHEN, Shih-Kai. *Effects of compression on the sound absorption of porous materials with an elastic frame*. Applied Acoustics vol. 69, pp. 31 – 39, 2008.

ZWICKKER, C.; KOSTEN, C. W. *Sound absorbing materials*. Editora Elsevier Science, 1949.

APÊNDICE A

“MÁQUINA PARA EXTRAÇÃO DE FIBRA DE AÇAÍ”

A presente patente de modelo de utilidade tem por objetivo um modelo de máquina para extração de fibra de açaí a partir de uma máquina convencionalmente utilizada para o processamento do fruto açaí, com vistas a melhorar a eficiência do processo de extração da referida fibra em relação aos processos manuais, comumente utilizados para tal.

Algumas metodologias utilizadas para este fim, ainda que em fase experimental, eram realizadas por máquinas rotativas complexas, as quais eram constituídas por reservatório ou gaiola, dispostos vertical ou horizontalmente, fechados em uma das extremidades e dotados de tampa de encaixe na outra, no qual um eixo concentricamente acoplado, acionado por um motor elétrico, realizava repetidas rotações ao mesmo tempo em que resistências elétricas dispostas internamente elevavam a temperatura do reservatório até que as fibras se desprendessem dos caroços.

As máquinas utilizadas para executar os processos supracitados, por se destinarem a outras finalidades, muitas vezes sofrem adaptações/alterações para executarem a referida operação e ainda, consomem grandes quantidades de tempo e energia elétrica para o pouco rendimento que apresentam.

Haja vista esses problemas e no intuito de superá-los foi desenvolvido um modelo de máquina para extração da fibra de açaí, objeto da presente patente, o qual consiste em promover a extração da fibra por meio da utilização de uma máquina convencionalmente utilizada para processar o fruto açaí com os devidos ajustes. Essa utilização da máquina soluciona os problemas apresentados uma vez que a extração é feita de forma rápida e eficiente utilizando-se uma máquina amplamente utilizada para outros fins e de baixo custo quando comparada a outros equipamentos, utilizados sob improviso, para a finalidade aqui mencionada.

Para um melhor entendimento das modificações feitas na estrutura da máquina, esta passará a ser descrita a seguir com referência a concretizações típicas da mesma e também com referência aos desenhos associados, nos quais:

A figura 1 apresenta, em vista explodida, as devidas modificações feitas na máquina, de acordo com a invenção.

A figura 2 ilustra, em vista lateral e isométrica, a configuração da máquina, bem como seus principais itens, de acordo com a invenção.

A máquina desenvolvida, de acordo com a figura 1, dispõe de um reservatório vertical (1), sustentado por duas braçadeiras (9) que estão conectadas a uma haste de sustentação (10). O referido reservatório é fechado em sua extremidade inferior e dotado de abertura na extremidade superior a qual é fechada por uma tampa de encaixe bipartida (2) com presilhas de pressão (8), por onde os caroços do fruto açaí, ainda com fibra, são colocados. No interior do reservatório encontra-se um eixo (3), concentricamente acoplado a uma polia (4) e esta acoplada a um motor elétrico por meio de uma correia, que, por sua vez, realiza repetidas rotações até que as fibras, por atrito, se desprendam dos caroços colocados no reservatório. O referido eixo possui dois pares de palhetas metálicas (5) (podendo possuir mais), dispostos perpendicularmente ao eixo, distanciados entre 12 e 17 cm um do outro, em faces diferentes. A palheta é constituída por um material mais resistente (aço 1030 ou superior) e apresenta espessura maior haja vista o desgaste apresentado pelo material original (chapas finas de zinco dobradas) depois de repetidas operações.

O motor elétrico utilizado possui frequência de operação entre 1800 a 2400 rpm e potência entre 1,0 e 1,75 hp, visando um menor tempo de processamento haja vista que o motor comumente utilizado para essas máquinas (geralmente com frequência de operação de 1800 rpm e 3/4 hp) pode efetuar a tarefa, só que em um tempo maior. Ainda de acordo com a figura 1, o disco metálico interno perfurado (6) que fica posicionado na extremidade inferior do

reservatório e tem a função de manter o eixo (3) em concentricidade com o reservatório (1) e separar o pó, resultante do processo de extração, das fibras, foi substituído por um disco de alumínio com espessura e furos maiores para que essa separação ocorresse de forma mais eficiente. A guia de abertura (7) por onde as fibras são retiradas, localizada próximo à base inferior, passou por uma soldagem de reforço devido à estrutura original apresentar fissuras depois de várias operações.

REIVINDICAÇÕES

1. Máquina para extração de fibra de açaí caracterizada por um reservatório vertical (1), sustentado por duas braçadeiras (9) ligadas a uma haste de sustentação (10), fechado em sua extremidade inferior e dotado de abertura na extremidade superior que é fechada por uma tampa de encaixe bipartida (2) com presilhas de pressão (8).

2. No reservatório encontra-se um eixo (3), caracterizado por possuir dois pares de palhetas metálicas (5), dispostos perpendicularmente e distanciados entre 12 e 17 cm um do outro, concentricamente acoplado a uma polia (4) e esta acoplada a um motor elétrico por meio de uma correia, que, por sua vez, realiza repetidas rotações até que as fibras, colocadas junto com os caroços no reservatório (1) através da abertura superior, sejam extraídas, de acordo com a reivindicação 1.

3. O disco de alumínio perfurado (6) posicionado na extremidade inferior do reservatório, é caracterizado por separar o pó, resultante do processo de extração das fibras, e manter o eixo (3) concentricamente posicionado em relação ao reservatório (1), de acordo com as reivindicações 1 e 2.

4. A guia de abertura (7) por onde as fibras são retiradas, localizada próximo à base inferior do reservatório (1), é caracterizada pelo fato de apresentar uma soldagem de reforço, devido à estrutura original apresentar fissuras depois de várias operações, de acordo com as reivindicações 1, 2 e 3.

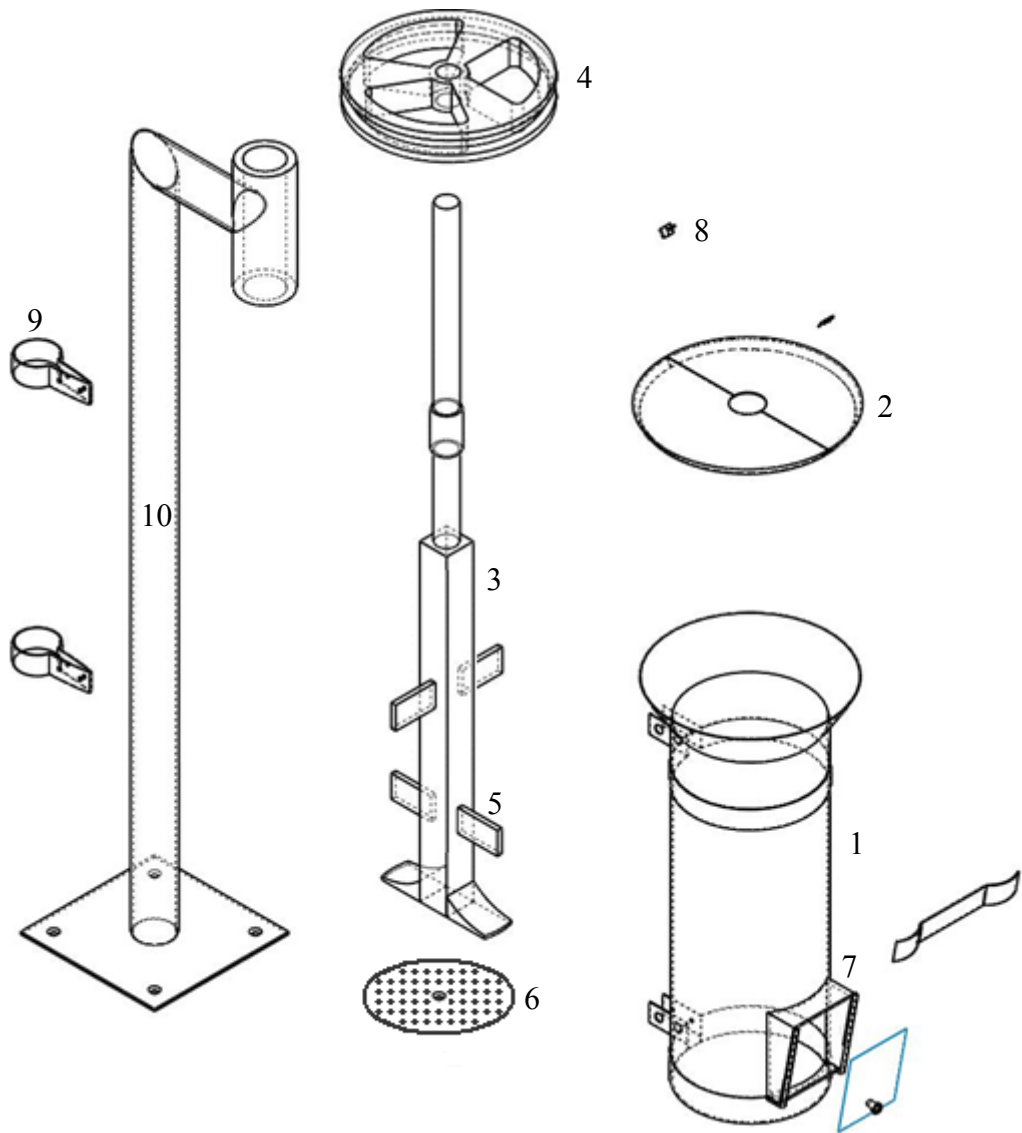
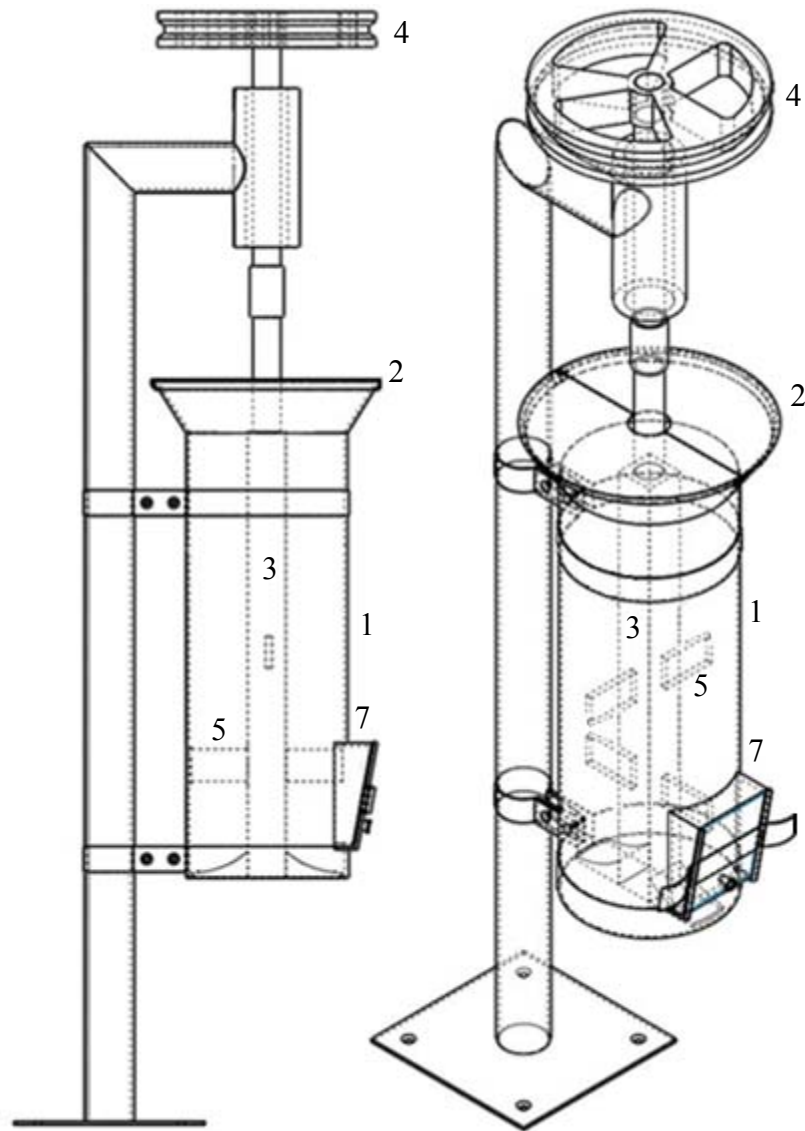
Fig. 1

Fig. 2

RESUMO

“MÁQUINA PARA EXTRAÇÃO DE FIBRA DE AÇAÍ” compreendida por um reservatório vertical (1), suspenso por duas braçadeiras (9) ligadas a uma haste de sustentação (10), fechado em sua extremidade inferior e com abertura na extremidade superior que é fechada por uma tampa de encaixe bipartida (2) por meio de presilhas de pressão (8), dotado de um eixo (3) que possui dois pares de palhetas metálicas (5), concentricamente acoplado a uma polia (4), e esta acoplada, por meio de uma correia, a um motor elétrico, que realiza repetidas rotações até que as fibras, colocadas junto com os caroços no reservatório (1), através da abertura superior, sejam extraídas. O reservatório dispõe também de um disco de alumínio perfurado (6) posicionado em sua extremidade inferior que separa o pó, resultante do processo de extração, das fibras, e mantém o eixo (3) concentricamente posicionado em relação ao reservatório (1). A guia de abertura (7) por onde as fibras são retiradas, é reforçada por solda.

APÊNDICE B

“PROCESSO DE PRODUÇÃO ARTESANAL E PAINÉIS DE FIBRAS VEGETAIS UTILIZADOS PARA CONTROLE DE RUÍDO”.

A presente invenção refere-se a um processo de produção artesanal e a painéis fabricados a partir de fibras vegetais utilizados para a finalidade de controle de ruído.

Atualmente a poluição sonora, em nível mundial, só não é mais grave do que a poluição do ar e da água. No Brasil a situação não é diferente, pois se estima que mais de 15 milhões de pessoas apresentem algum grau de deficiência auditiva devido a este problema ambiental.

Técnicas de controle de ruído (ativo, passivo e combinado) foram e ainda são concebidas, no intuito de reduzir o nível de poluição sonora de ambientes. Técnicas essas que são, em geral, específicas para cada caso e, que, atualmente, esbarram em um aspecto: o custo, ao qual, até então, não se dava devida importância em razão dos benefícios obtidos através destas.

Dispositivos acústicos convencionais como portas, painéis, barreiras, entre outros, quando de alta eficiência, geralmente, são de custosa aquisição, tornando, em muitas vezes, inviável sua utilização, principalmente, por empresas de pequeno porte e orçamento limitado. Além do que, os materiais existentes no mercado ou atuam como isolantes ou como absorventes sonoros, nunca desempenham as duas funções, ou seja, o material que possui elevada capacidade de isolamento acústico quase não tem poder de absorção acústica, e vice-versa. Outros materiais não possuem nem características de absorção acústica, tampouco de isolamento acústico, como plásticos leves e impermeáveis, por exemplo. Assim, soluções alternativas, a começar por novos materiais acústicos que sejam menos custosos e apresentem bom desempenho acústico, surgem como uma ótima opção caso propostas tradicionais sejam inviabilizadas pelo custo

Algumas fibras vegetais, na forma de painéis, possuem características acústicas satisfatórias quando utilizadas para reduzir reverberação

em ambientes fechados. Em alguns casos, como por exemplo, painéis industrialmente fabricados a partir de fibra de coco e látex, apresentam desempenho superior ao dos materiais acústicos comercialmente disponíveis. No entanto, são painéis fabricados através de processos industriais complexos e que demandam de maquinário dispendioso.

Conhecendo esses problemas e na intenção de superá-los foi desenvolvido um processo de produção artesanal para a realização de painéis de fibras vegetais, objeto da presente patente.

A patente passará a ser descrita a seguir com referência a concretizações típicas da mesma e também com referência aos desenhos associados, nos quais:

A figura 1 apresenta, em vista lateral, a configuração de montagem dos referidos painéis, mostrando a sobreposição das camadas de fibras intercaladas por camadas de aglomerantes, de acordo com a invenção.

O processo consiste em sobrepor manualmente, de acordo com a figura 1, camadas de fibras vegetais (1) intercaladas por camadas de aglomerante (2) à base de acrilato e água, em um molde retangular (3) de largura entre 0,4 e 0,6 m, de comprimento entre 0,5 e 0,7 m, e altura entre 0,1 m e 0,2 m. Após a sobreposição de uma nova camada de fibra, é aplicada uma pressão de prensagem entre 40 e 65 kgf/cm² durante um período de 15 a 25 minutos, por meio de uma prensa hidráulica, em uma tampa metálica rígida (4) com alças (5), com dimensões superficiais ligeiramente menores que as do molde e espessura entre 0,01 e 0,02 m, que transfere essa pressão às camadas de fibras (1) e as acomoda na forma de painel. A prensagem final, utilizada para promover a agregação final das camadas de fibras (1) sobrepostas pode variar entre 70 e 100 kgf/cm² durante um período de 45 a 60 minutos. Cada painel é constituído por quatro camadas de fibras, cada uma apresentando entre 250 e 350 g de massa, intercaladas por camadas de aglomerante (2), estas aplicadas à uma pressão

entre 20 a 40 psi através de uma pistola de pintura conectada a um compressor de ar.

Durante todas as etapas do processo, as fibras não passam por processos físico-químicos importantes, restringido-as a lavagem e secagem, ou seja, as fibras não passam, previamente, por processos de modificação estrutural visando uma adesão mais fácil entre elas, o que o torna um processo prático e de custo muito menor do que os convencionalmente utilizados, além do fato de que o tempo de elaboração dos painéis é menor, pois o aglomerante utilizado é de secagem rápida e progressiva, aumenta a durabilidade dos painéis, pois é um aglomerante sintético, e, após alguns ensaios experimentais, constatou-se também que possui considerável capacidade de retardar chamas.

As fibras utilizadas para a realização dos painéis aqui mencionados foram fibras de: dendê, açai, coco e sisal; para outros tipos de fibras não se pode afirmar que o processo terá êxito uma, vez que depende de fatores como compatibilidade entre o aglomerante e a fibra, por exemplo.

REIVINDICAÇÕES

1. Processo de produção artesanal e painéis de fibras vegetais, utilizados para controle de ruído, caracterizados pelo fato da confecção dos painéis ser feita por processo manual e os referidos painéis serem fabricados pela sobreposição de camadas de fibras vegetais (1) intercaladas por camadas de aglomerante (2) e então prensadas para compor os painéis, visando utilizá-los para a finalidade de controle de ruído.

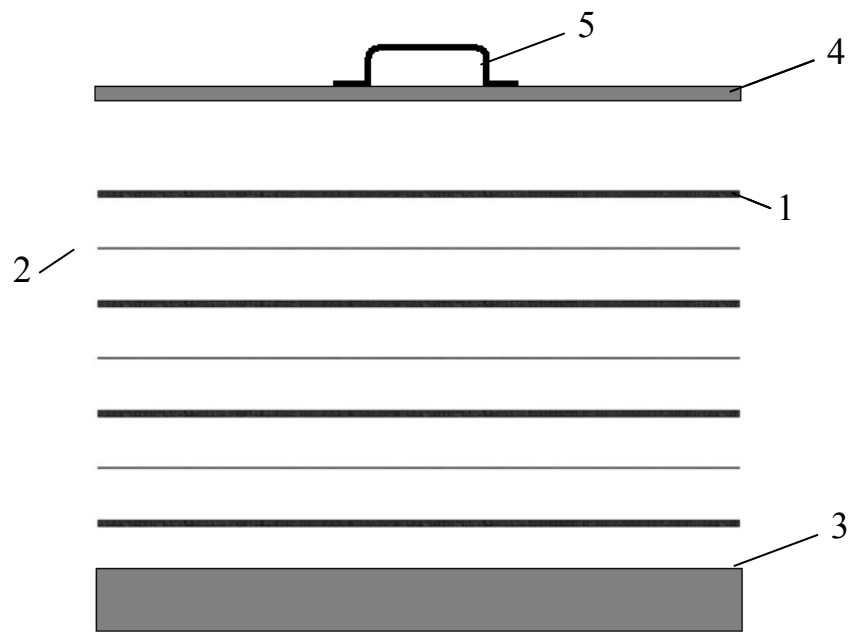
2. As camadas de fibras (1) são acomodadas em um molde metálico (3), e são caracterizadas pelo fato de serem prensadas por meio de uma prensa hidráulica que pressiona uma tampa metálica rígida (4) com alças (5) e esta transfere a pressão às camadas de fibras, de acordo com a reivindicação 1.

3. A sobreposição de uma nova camada de fibra (1), é caracterizada pelo fato de ser pressionada em um molde metálico (3) com uma pressão de prensagem entre 40 e 65 kgf/cm² durante um período de 15 a 25 minutos para acomodar as camadas de fibras (1) no formato do painel, de acordo com as reivindicações 1 e 2.

4. A prensagem final, utilizada para promover a agregação final das camadas de fibras (1) sobrepostas, é caracterizada pelo fato de ter intensidade entre 70 a 100 kgf/cm² e tempo de duração entre 45 a 60 minutos, de acordo com as reivindicações 1, 2 e 3.

5. Cada painel é constituído por quatro camadas de fibras (1), caracterizadas por apresentarem entre 250 e 350 g de massa, intercaladas por camadas de aglomerante (2), estas aplicadas à uma pressão de 20 a 40 psi através de uma pistola de pintura conectada a um compressor de ar, de acordo com as reivindicações 1, 2, 3 e 4.

Fig.1



RESUMO

“PROCESSO DE PRODUÇÃO ARTESANAL E PAINÉIS DE FIBRAS VEGETAIS UTILIZADOS PARA CONTROLE DE RUÍDO”. Patente de Inovação de um processo de produção artesanal e painéis de fibras vegetais utilizados para controle de ruído. De acordo com a invenção, os referidos painéis são fabricados pela sobreposição de camadas de fibras vegetais (1) intercaladas por camadas de aglomerante (2), sendo acomodadas em um molde metálico (3) e então prensadas por meio de uma prensa hidráulica que pressiona uma tampa metálica rígida (4) com alças (5) e esta transfere a pressão às camadas de fibras (1). Após a sobreposição de uma nova camada de fibra, as camadas contidas no molde metálico (3) são prensadas visando a acomodá-las no formato do painel. A prensagem final, utilizada para promover a agregação final das camadas de fibras (1) sobrepostas, é aplicada após a sobreposição das quatro camadas de fibras (1) que cada painel é constituído.

ANEXO 1

SIMULANDO NO ODEON 9.2 COMBINED

São apresentados, a seguir, algumas recomendações e os principais passos para se modelar acusticamente um determinado ambiente utilizando-se o *software* ODEON 9.2 Combined, a fim de facilitar a utilização deste programa por parte de usuários iniciantes e fornecer mais detalhes das simulações numéricas mencionadas no Capítulo 5 deste trabalho. Em seguida, esses procedimentos (recomendações e passos) são utilizados para realizar a modelagem acústica da sala de aula DP-11 do bloco setorial II do Campus Profissional da Universidade Federal do Pará (UFPA), ambiente analisado neste trabalho.

O ODEON 9.2 Combined oferece aos usuários ferramentas práticas permitindo menor tempo de pré-processamento (aplicação de propriedades de absorção sonora e fator de espalhamento nas superfícies, valores de transmissibilidade, caracterização das fontes sonoras, definição dos microfones nas salas e estimativas do Tempo de Reverberação através de equação de *Sabine, Eyring e Arau-Puchades*, etc.), além disso, permite ao usuário investigar parâmetros como o EDT (*Early Decay Time*), SPL (*Sound Pressure Level - A*), SPL(A), STI (*Speech Transmission Index*) e o Tempo de Reverberação, calculados através do método híbrido de acústica de raios.

Em resumo, a modelagem acústica é alcançada através das seguintes etapas:

1. Construção do modelo geométrico;
2. Importação para o ambiente ODEON;
3. Caracterização das fontes sonoras e dos receptores (microfones);
4. Aplicação das propriedades de absorção nas superfícies do modelo geométrico;
5. Configuração do grau de precisão para os cálculos dos parâmetros acústicos; e
6. Execução dos cálculos e visualização dos resultados.

1. Construção do modelo geométrico

O modelo geométrico do ambiente analisado neste trabalho foi construído em AutoCAD, sendo exportado para o *software* de acústica de salas ODEON com formato compatível (formato “.**dxfl**”). O referido ambiente possui as seguintes dimensões de 8 x 6,25 x 2,73 m. A seguir é mostrada a representação da sala pelo seu respectivo modelo geométrico no qual as superfícies correspondentes aos objetos reais são indicadas na Figura 1.

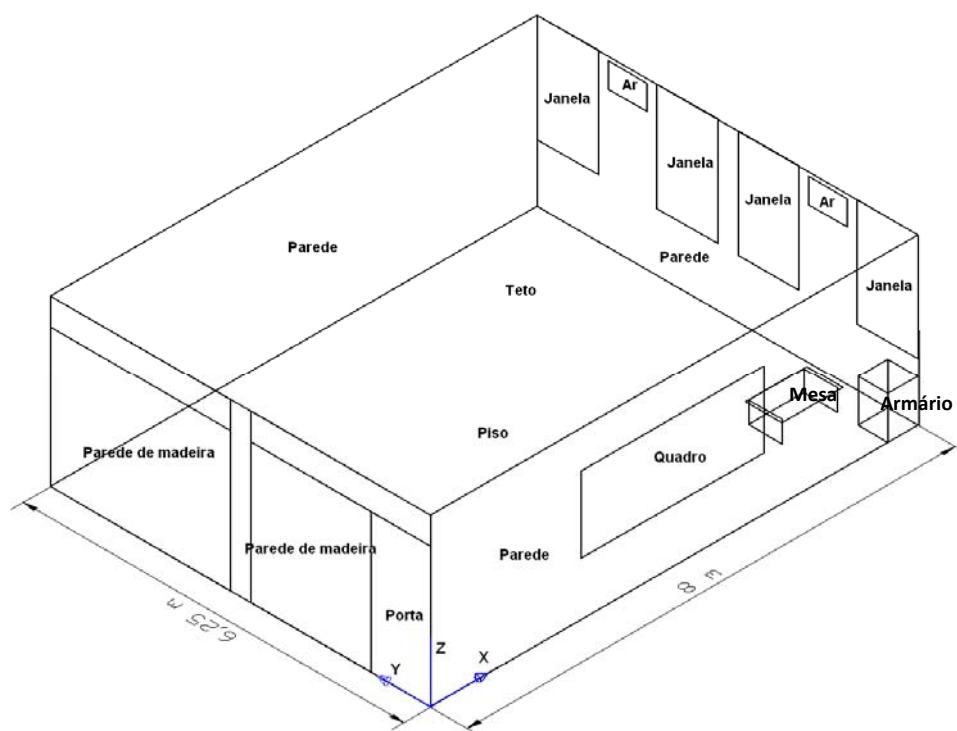


Figura 1 - Correspondência das superfícies do modelo geométrico aos objetos reais presentes na sala.

No AutoCAD define-se uma origem para o sistema de coordenadas, neste caso a origem ficou no canto da sala próximo a porta. Esse sistema de coordenadas auxilia na definição das posições das fontes e dos microfones, que também são definidos no AutoCAD, e a própria construção da sala.

Inicialmente são construídas as linhas que delimitam as áreas, posteriormente essas áreas são transformadas em superfícies através da ferramenta “3DFACE” do AutoCAD. Em seguida, é recomendável que se aplique *layers* aos conjuntos de áreas semelhantes, por exemplo, áreas das janelas podem ser construídas com *layer* janela. Isso facilita na aplicação das propriedades de absorção sonora no ODEON, pelo fato deste reconhecer os *layers* do AutoCAD.

A Figura 2, a seguir, mostra a sala analisada neste trabalho, construída com áreas definidas por *layers*.

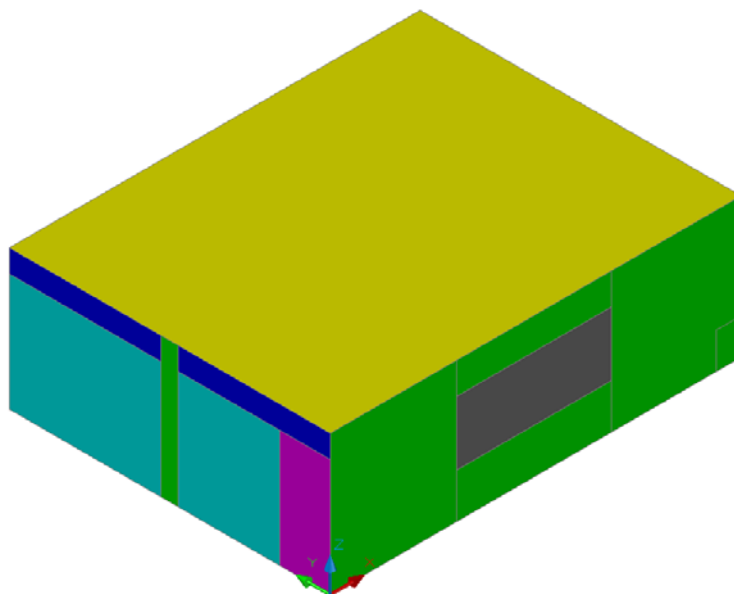


Figura 2 - Modelo geométrico do ambiente real analisado construído com áreas definidas por *layers*.

O arquivo deve ser salvo no formato “**.dxf**” e não deve está sendo executado no AutoCAD quando for importado para o ODEON, para que não haja nenhum conflito entre os programas.

2. Importação para o ambiente ODEON

Com o *software* ODEON 9.2 *Combined* aberto, como mostrado na Figura 3, no menu “**File**” clica-se em “**Importe from file (dxf, 3ds, cad)**” para a importação do modelo geométrico. Será executada a janela da Figura 4 para que seja aberto o arquivo do modelo geométrico. Neste caso o modelo geométrico foi salvo como “**Sala DP-11.dxf**” em um diretório “**Modelo**”, como pode ser visto também na Figura 4.



Figura 3 - Seleção do Menu File.

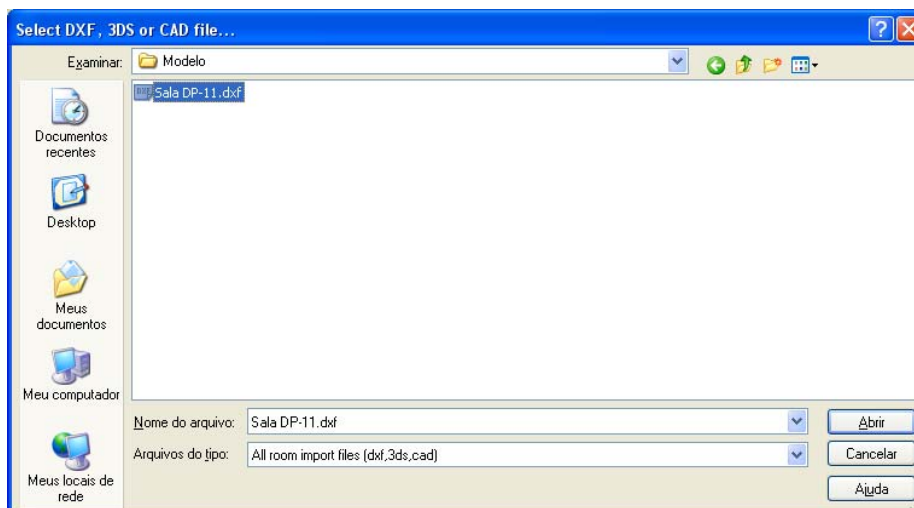


Figura 4 - Importação do modelo geométrico construído na plataforma AutoCAD (**Sala DP-11.dxf**) do diretório “**Modelo**” para o software ODEON.

Clicando-se em “**Abrir**” na Figura 4, será exibida a janela mostrada na Figura 5, a seguir, na qual deverá ser especificado o diretório para salvar o arquivo “**.Par**” criado pelo ODEON para o modelagem acústica da sala. Recomenda-se o mesmo diretório onde se encontra o arquivo do modelo geométrico.

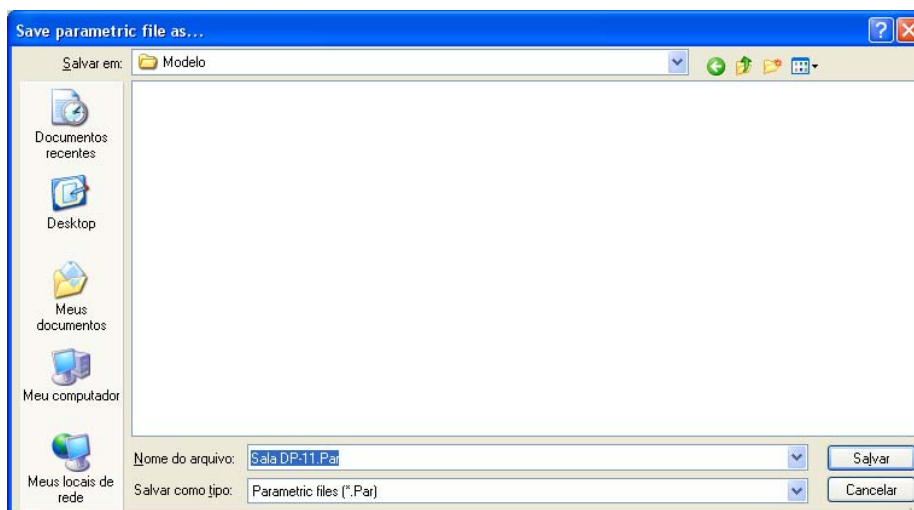


Figura 5 - Especificação do diretório para salvar o arquivo “**.Par**” criado pelo ODEON.

Observa-se que o nome do arquivo “**.Par**” por padrão (*default*) é o mesmo do arquivo “**.dxf**”. Na Figura 5, ao clicar em “**Salvar**” será executada a janela mostrada na Figura 6 apresentada a seguir.

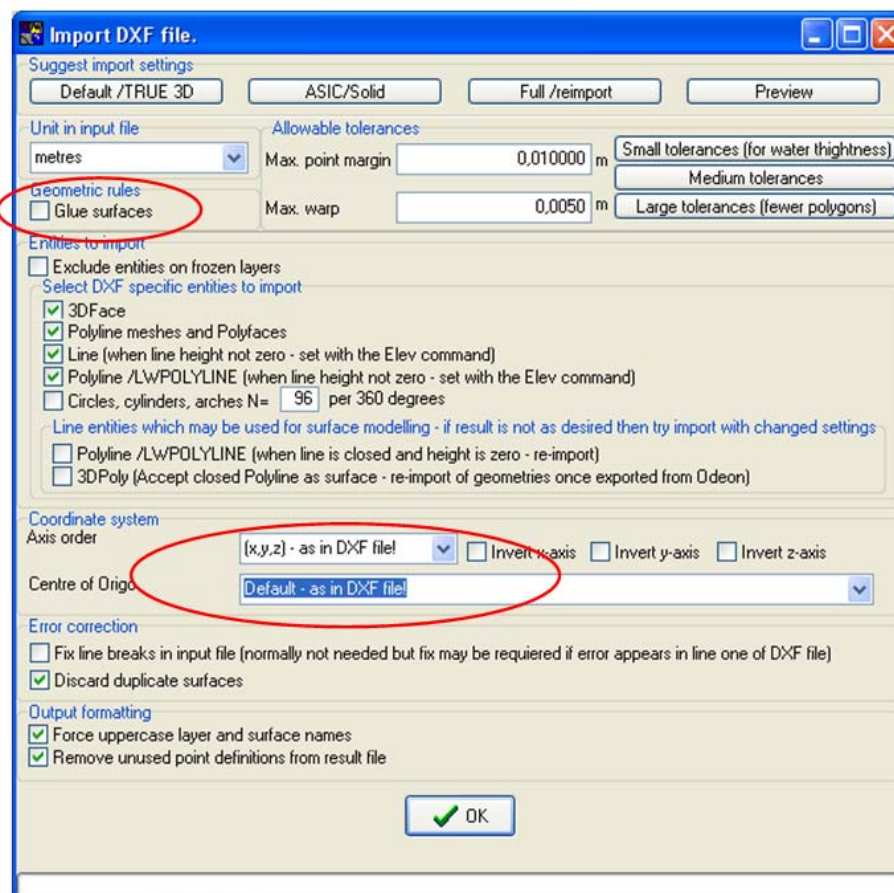


Figura 6 - Janela inicial, anterior à execução de arquivo de modelagem acústica no ODEON.

Nesta janela é preciso certificar-se que em “**Geometric rules**” a opção “**Glue surfaces**” esteja desabilitada, que no campo “**Axis order**” esteja selecionado **(x,y,z) - as in DXF file!** e que no campo “**Center of Origin**” esteja selecionado “**Default - as in DXF file!**” Isso é importante para que áreas que estão propositalmente divididas não sejam somadas e para que o sistema de coordenadas seja o mesmo adotado no AutoCAD.

Ao clicar em “**OK**” na janela da Figura 6 a malha será mostrada no ambiente ODEON como pode ser visto na Figura 7.

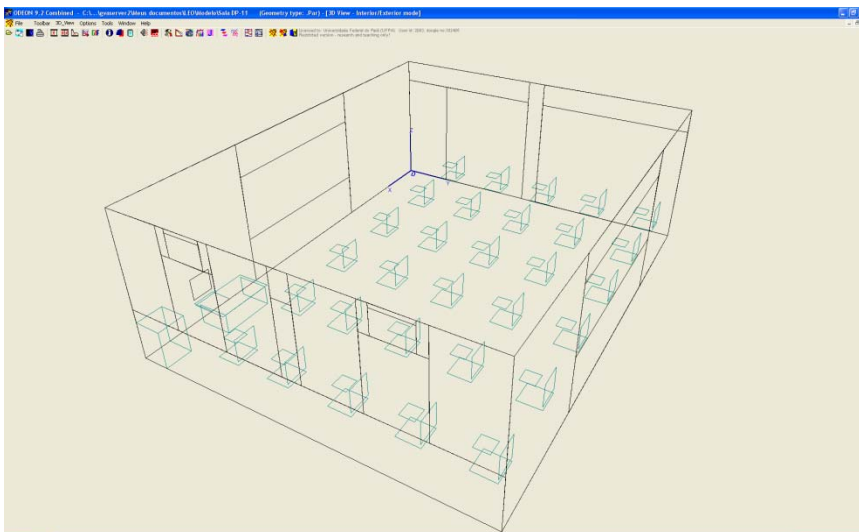



Figura 7 - Modelo geométrico em ambiente computacional com as superfícies definidas.

É possível observar que as áreas e a origem do sistema de coordenadas são as mesmas anteriormente definidas no AutoCAD. Clicando no ícone  (ver Figura 8) é exibida a janela da Figura 9 com as informações das dimensões do modelo geométrico.

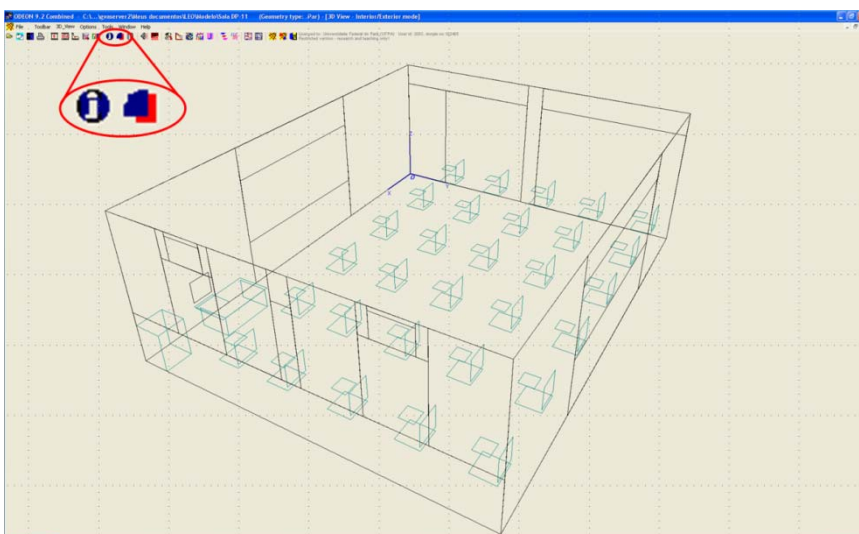


Figura 8 - Detalhe do ícone que apresenta as dimensões do modelo geométrico em uma janela à parte.

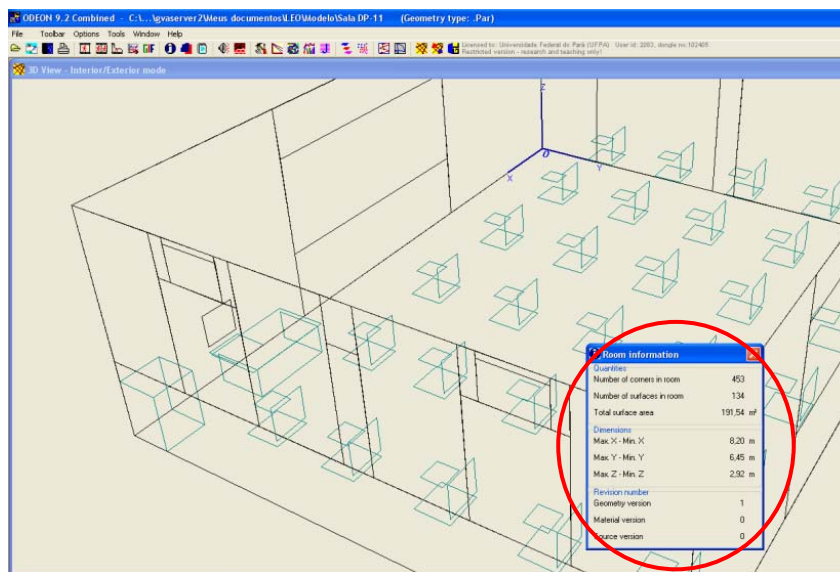



Figura 9 - Dimensões do modelo geométrico apresentadas em uma janela à parte.

É recomendável que se clique no ícone , mostrado anteriormente na Figura 8, para verificar se existe duplicação ou sobreposição de superfícies (ver Figura 10). No caso deste trabalho não foi detectado nenhum erro, porém, caso ocorram erros, as superfícies com erro devem ser observadas e reconstruídas no programa em que foram inicialmente construídas (neste caso no AutoCAD). Em seguida, o modelo geométrico deve ser importado, como explicado anteriormente, e salvo sobreposto ao arquivo anterior. Desta forma será atualizado apenas o modelo geométrico.

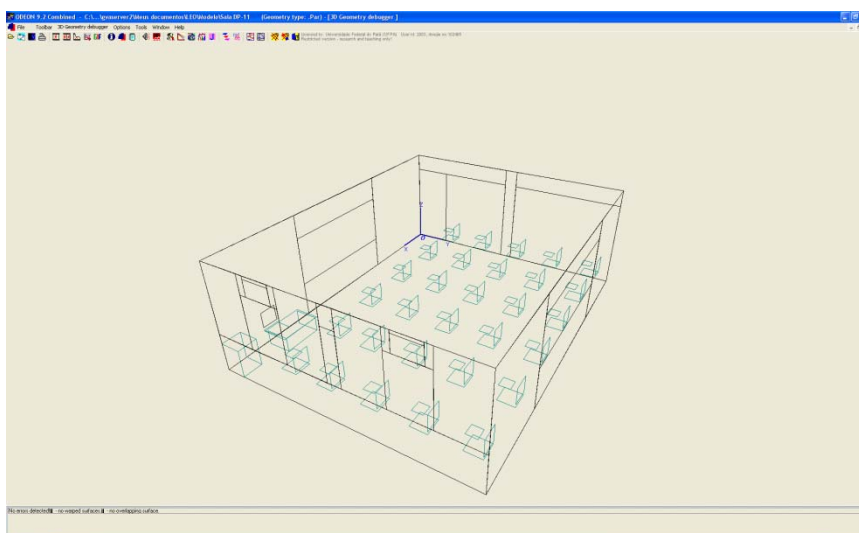


Figura 10 - Verificação de duplicação e sobreposição de superfícies no modelo geométrico.

3. Caracterização das fontes sonoras e dos receptores (microfones)

Foram utilizadas seis posições aleatórias de microfones para o levantamento experimental dos parâmetros acústicos mencionados no Capítulo 5 deste trabalho. As coordenadas aproximadas dos microfones, ainda que não sejam informações necessárias para a realização das simulações, estão mostradas na Tabela 1. Para excitar a sala foram utilizadas duas posições de fonte sonora e suas coordenadas aproximadas, essas sim necessárias, estão mostradas na Tabela 2. Estas coordenadas foram retiradas do AutoCAD.

Tabela 1 - Coordenadas aproximadas das posições de microfone.

Microfone	Coordenada x (m)	Coordenada y (m)	Coordenada z (m)
01	5,30	1,80	1,20
02	5,30	4,75	1,20
03	2,55	1,25	1,20
04	2,50	5,25	1,20
05	1,20	2,00	1,20
06	1,20	4,75	1,20


Tabela 2 - Coordenadas aproximadas das posições de fonte.

Fonte	Coordenada x (m)	Coordenada y (m)	Coordenada z (m)
1	0,20	0,18	0,18
2	6,80	6,10	0,18

O Nível de Potência Sonora (dB), por bandas de oitavas, da fonte sonora está mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Nível de Potência Sonora da fonte por bandas de oitavas.

Fonte	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
01	60	60	60	60	60	60	60	60
02	60	60	60	60	60	60	60	60

Clique no botão  , destacado na Figura 11, para abrir a janela de configuração mostrada na Figura 12.

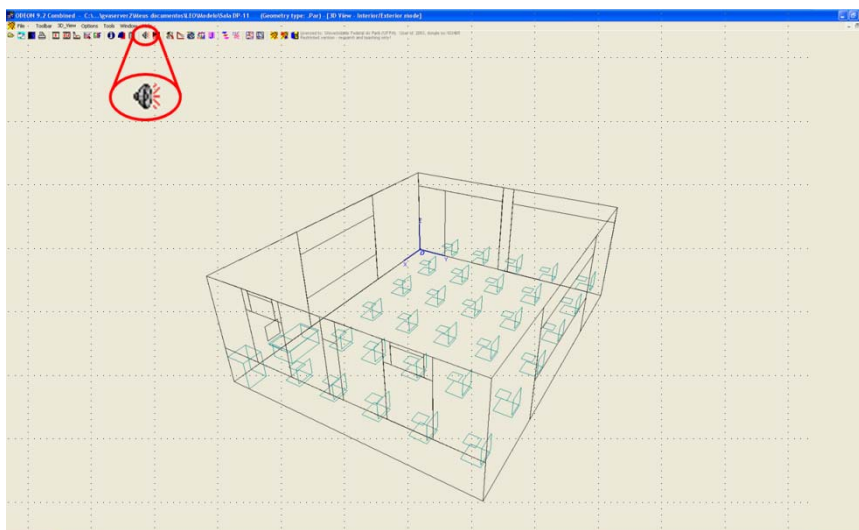


Figura 11 - Selecionando o ícone que permite a configuração de fontes sonoras e receptores.

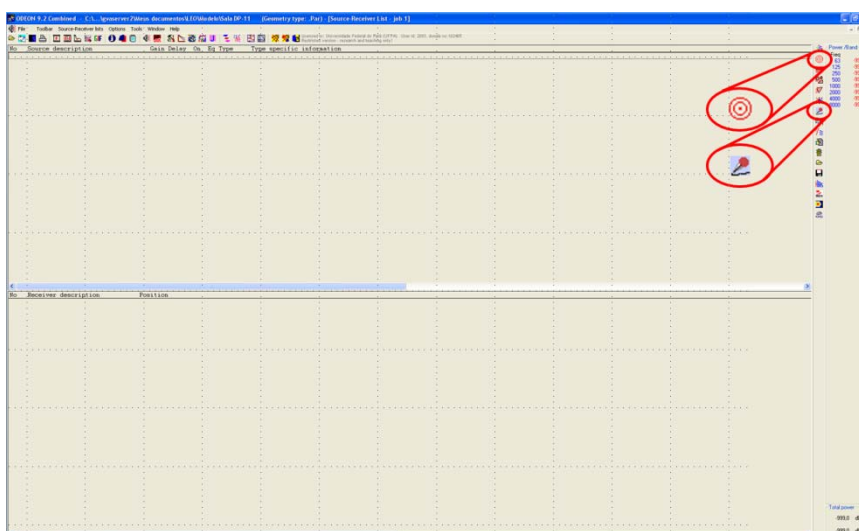



Figura 12 - Ícones para a configuração de fontes sonoras e receptores individualmente.

Na janela da Figura 12, clica-se no ícone  para caracterizar uma fonte sonora pontual no modelo. Em seguida, são preenchidos os campos destacados na Figura 13, a seguir, com os dados das Tabelas 2 e 3. O mesmo procedimento é feito para configurar a segunda posição de fonte, mudando apenas as coordenadas.

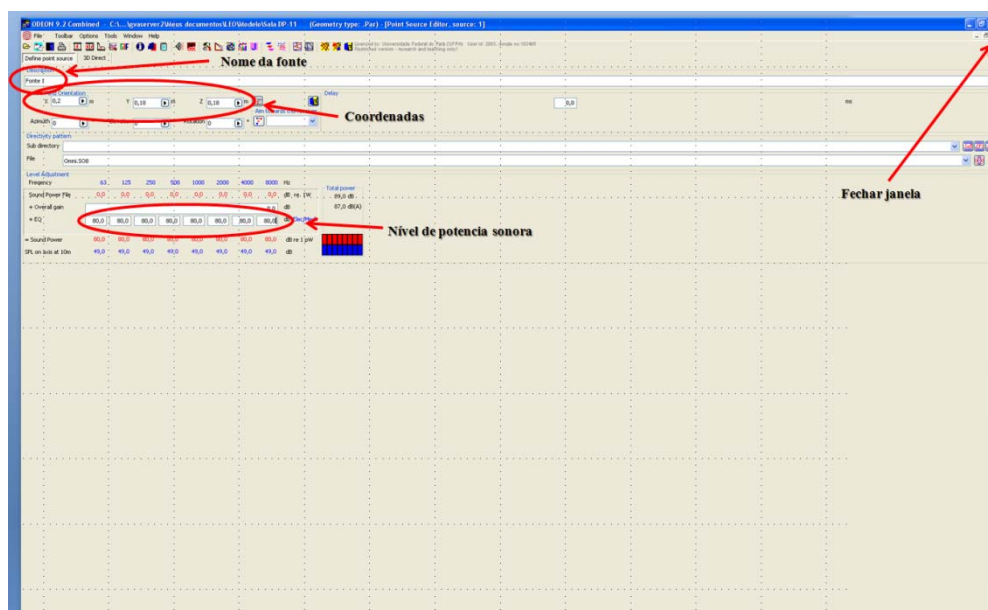




Figura 13 - Definindo o as características da fonte (Nível de Potência Sonora e coordenadas).

Para salvar esta configuração de fonte sonora é preciso clicar no botão  para fechar a subjanela (ver Figura 13).

Para especificar as posições de microfones basta clicar no ícone  (ver Figura 12). São inseridos, em seguida, um nome para cada posição de microfones e suas coordenadas na janela executada, como na Figura 14.

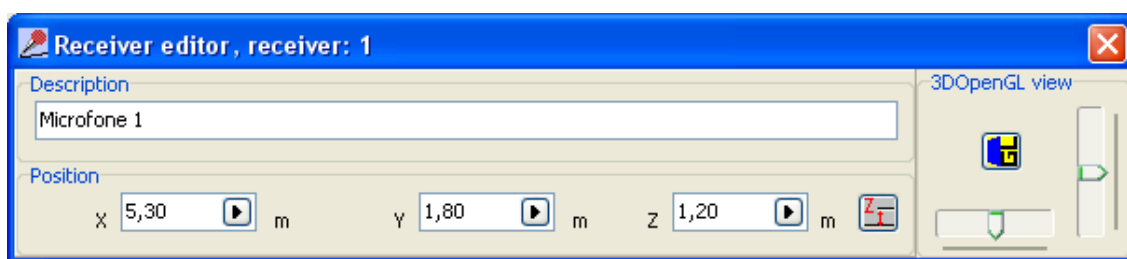



Figura 14 - Configuração das posições de microfones.

Clicando-se no ícone , a janela é fechada e as configurações desta posição de microfones são salvas. Para configurar as outras posições de microfones, o mesmo procedimento, utilizado anteriormente, deve ser seguido. Ao definir todas as posições de fonte e microfones, o modelo deve estar como na Figura 15.

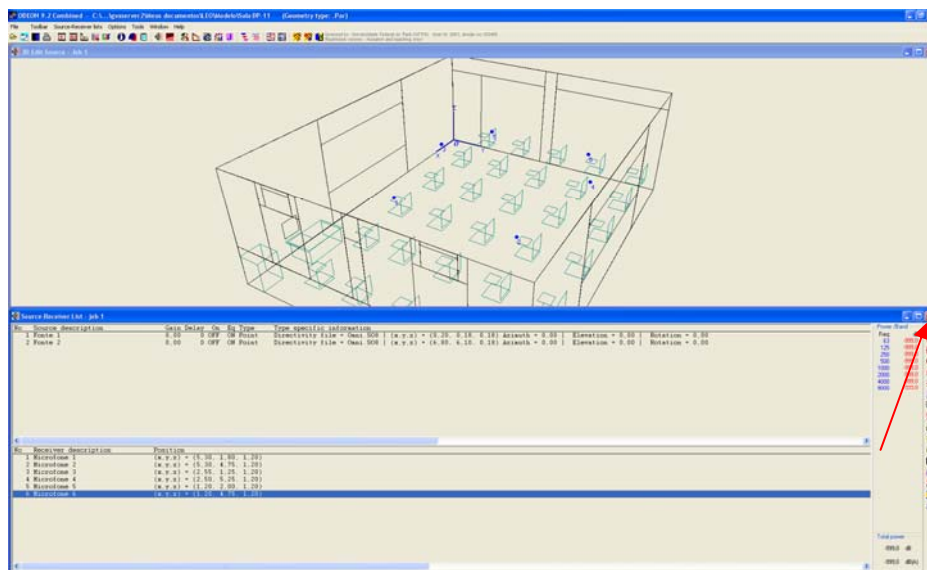



Figura 15 - Modelo com as posições de fonte e microfone definidas.

A janela “**Sourcer-Receiver List-job 1**” é então fechada para se avançar ao próximo passo.

4. Aplicação das propriedades de absorção nas superfícies do modelo geométrico

Clicando-se no ícone  é possível definir as propriedades de absorção sonora dos elementos do modelo, como mostrado na Figura 16.

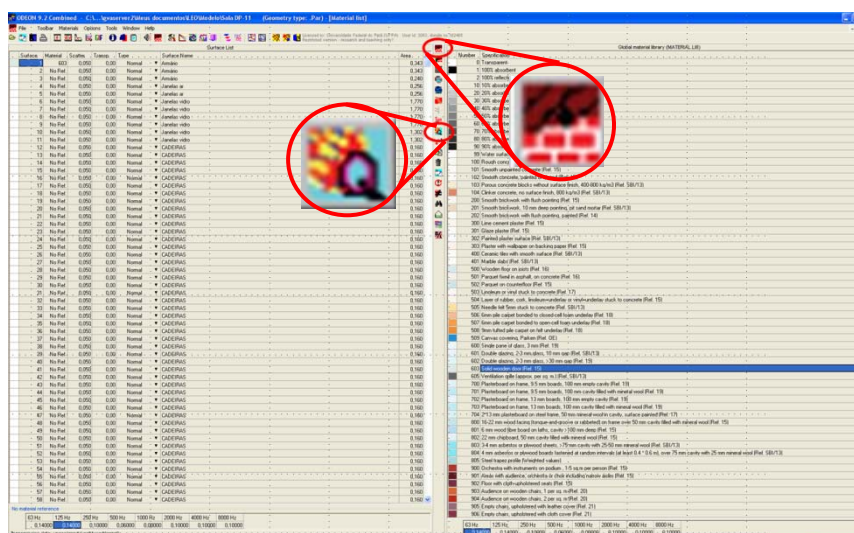



Figura 16 - Definindo as propriedades de absorção sonora dos elementos (superfícies) do modelo.

Na Figura 16, anteriormente apresentada, a janela à esquerda mostra as superfícies do modelo geométrico criadas no AutoCAD, organizadas de acordo com os *layers*. Do lado direito é apresentada a lista de materiais que o programa ODEON oferece. Para atribuir

determinada característica de absorção a uma superfície, basta selecionar uma superfície do lado esquerdo e, posteriormente, uma característica de absorção na janela à direita e, em seguida, clicar no ícone .

A Tabela 4 mostra os *layers* definidos no AutoCAD, a numeração correspondente aos materiais da lista do ODEON, suas características de absorção e suas respectivas áreas.


Tabela 4 - Características dos elementos (superfícies) dos modelos geométricos.

Objeto	Área total (m ²)	Material	Coeficiente de absorção sonora por bandas de oitavas							
			63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Armário	0,93	603	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Porta	2,25									
Janelas	9,68	2379	0,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04
Carteiras	11,49	*2465	0,015	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
Mesa	1,30									
Paredes	28,35	2010	0,10	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08
Quadro	3,70	703	0,30	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05
Piso	50,00	2313	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
Teto	30,32	102	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Aluno	1,27	903	0,16	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78	0,78
Audiência máxima	39,25									
Paredes de madeira	11,25	2389	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,11
Painéis de sisal (20 mm)	32,30	*2466	0,07	0,07	0,17	0,29	0,48	0,68	0,77	0,28
Painéis de açai (30 mm)	32,30	*2467	0,13	0,54	0,37	0,48	0,81	0,79	0,87	0,89
Flexonic (75 mm)	32,30	*2468	0,23	0,23	0,68	0,98	1,04	0,97	0,99	0,99

* materiais adicionados à biblioteca do ODEON através de caracterização acústica em minicâmara reverberante.

Descrição dos materiais utilizados nos modelos de simulação:

- 102 – Smooth concrete, painted or glazed
- 603 – Solid wooden door
- 703 – Plasterboard on frame
- 903 – Audience on wooden chairs (1 person per square meter)
- 2010 – Concrete block
- 2313 – Floors linoleum directly on concrete
- 2379 – Windows glass
- 2389 – Wood walls (8 mm)
- 2465 – Plywood
- 2466 – Painéis de sisal
- 2467 – Painéis de açai
- 2468 – Flexonic (75 mm)

Com os materiais definidos, clica-se no ícone , destacado na Figura 16, para se ter uma estimativa do Tempo de Reverberação da sala baseado nas equações de Sabine,

Eyring e Arau-Puchades, como mostrado na Figura 17, a seguir. Os resultados obtidos através das simulações pouco divergem em relação aos apresentados por esta estimativa rápida.

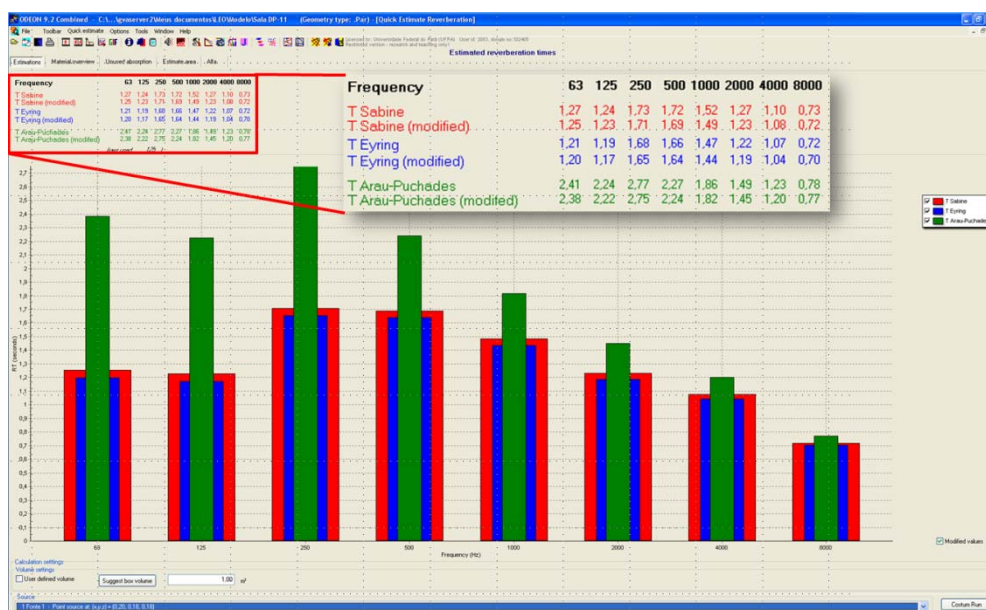



Figura 17 - Estimativa rápida do Tempo de Reverberação da sala baseando-se nas equações de Sabine, Eyring e Arau-Puchades.

Em seguida, os resultados numéricos, mostrados através da estimativa rápida do Tempo de Reverberação devem ser comparados com os obtidos experimentalmente, a fim de se obter a validação (calibração) do modelo geométrico quando a divergência entre esses valores for pequena (geralmente, menor do que 5%). Caso contrário, outros materiais devem ser selecionados, até que as diferenças entre os valores, numérico (ODEON) e experimental (medições), se tornem significativamente pequenas.

As limitações do programa ODEON 9.2 Combined já foram abordadas no Capítulo 5 com maiores detalhes, porém, é lembrado aqui, que este software possui confiabilidade para altas frequências, principalmente se o ambiente for relativamente pequeno e conter vários obstáculos (objetos), como a sala de aula estudada neste trabalho.

As janelas internas do ODEON são, então, fechadas para que as definições dos materiais sejam salvas.

5. Configuração do grau de precisão para os cálculos dos parâmetros acústicos

Clicando-se no ícone  é possível configurar os parâmetros dos cálculos no ODEON, na janela surge em seguida, mostrada na Figura 18.

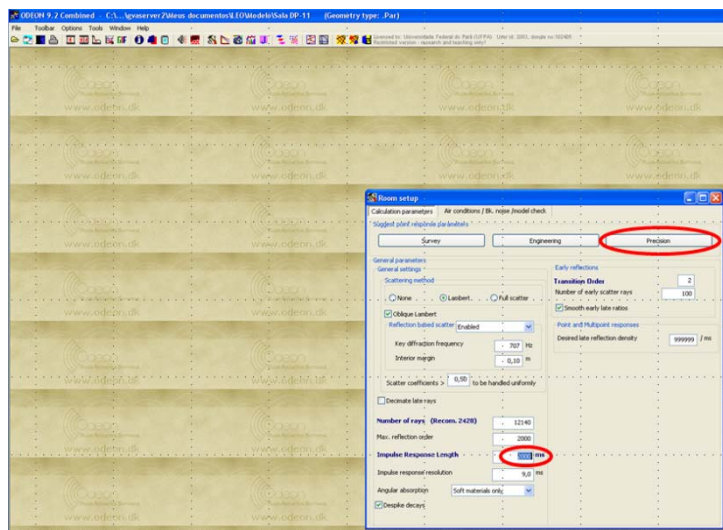



Figura 18 - Janela para configurar os parâmetros de cálculos do modelo geométrico.

Clicando-se no botão “**Precision**”, e inserindo-se o valor de **2000 ms** no campo “**Impulse Response Length**” obtêm-se resultados com maior precisão.

6. Execução dos cálculos e visualização dos resultados

Clicando-se no ícone  a janela de configuração dos trabalhos de calculo é mostrada (ver Figura 19), na qual, habilita-se as fontes sonoras (1), descreve-se a linha de trabalho (2), seleciona-se a Fonte 1 (3), habilita-se o campo “**Multi**” da linha de trabalho (4) e seleciona-se o Microfone 1 (5).

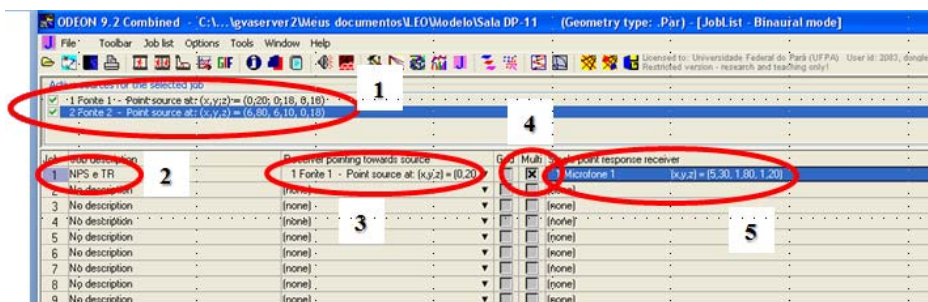



Figura 19 - Janela para configuração dos trabalhos de calculo

Após estas configurações clica-se no ícone  para que seja apresentada a janela seguinte (ver Figura 20), na qual é mostrada uma estimativa do tempo de duração dos cálculos.

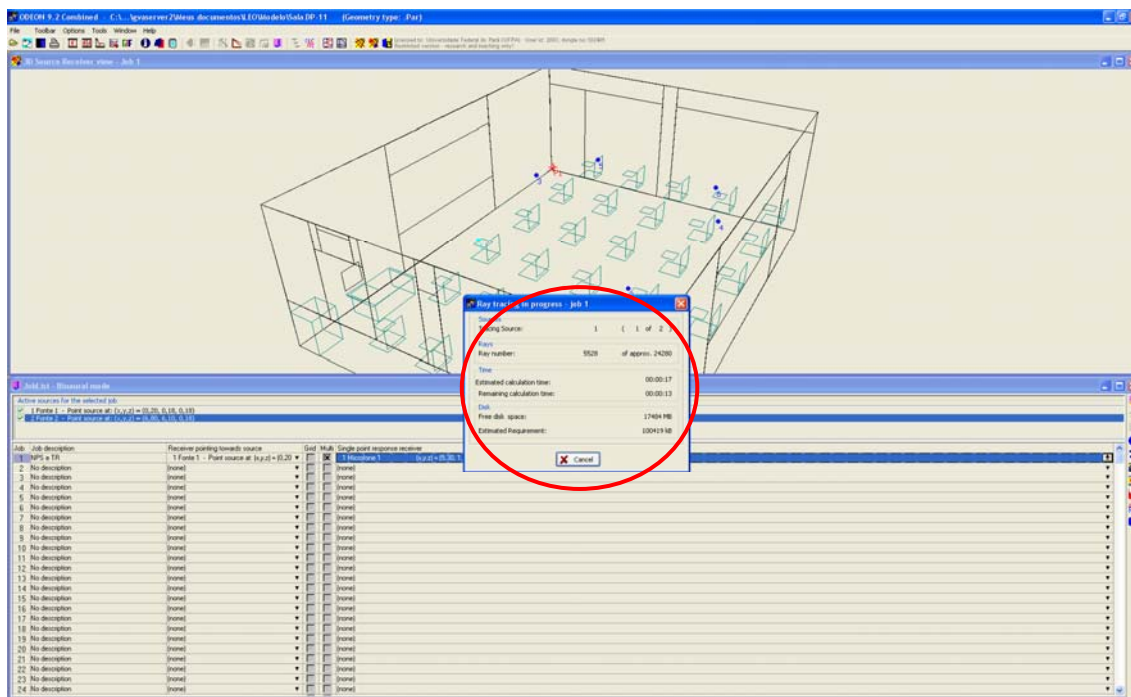



Figura 20 - Estimativa do tempo de duração dos cálculos.

Com o procedimento finalizado, clica-se no ícone  e, em seguida, será exibida a janela mostrada na Figura 21, na qual destaca-se os valores do termo T_{30} .

EDT (s)	Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum		1.01	1.12	1.81	1.80	1.63	1.30	1.12	0.75
Maximum		1.17	1.25	1.91	1.88	1.72	1.45	1.28	0.81
Average		1.07	1.19	1.87	1.85	1.67	1.37	1.20	0.79
T30 (s)	Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum		1.05	1.19	1.75	1.71	1.52	1.31	1.13	0.75
Maximum		1.12	1.26	1.88	1.82	1.70	1.43	1.26	0.88
Average		1.08	1.22	1.82	1.78	1.60	1.35	1.21	0.80
SPL (dB)	Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum		74.9	75.5	77.6	77.6	77.6	76.0	75.2	72.8
Maximum		75.7	76.2	78.1	78.1	77.4	76.4	75.8	73.9
Average		75.4	75.9	77.9	77.9	77.2	76.2	75.5	73.3

Figura 21- Visualização dos resultados dos parâmetros acústicos paleta “Energy Parameters”.

Clica-se na paleta “**Energy Parameters**”, como destacado na Figura 22, a seguir. Nesta paleta estão todos os resultados, em cada microfone e as médias. No final da paleta está o resultado médio do Tempo de Reverberação da sala. Este parâmetro, geralmente, é utilizado como referência para se fazer comparações entre os valores experimentais e numéricos, visando a validação do modelo.

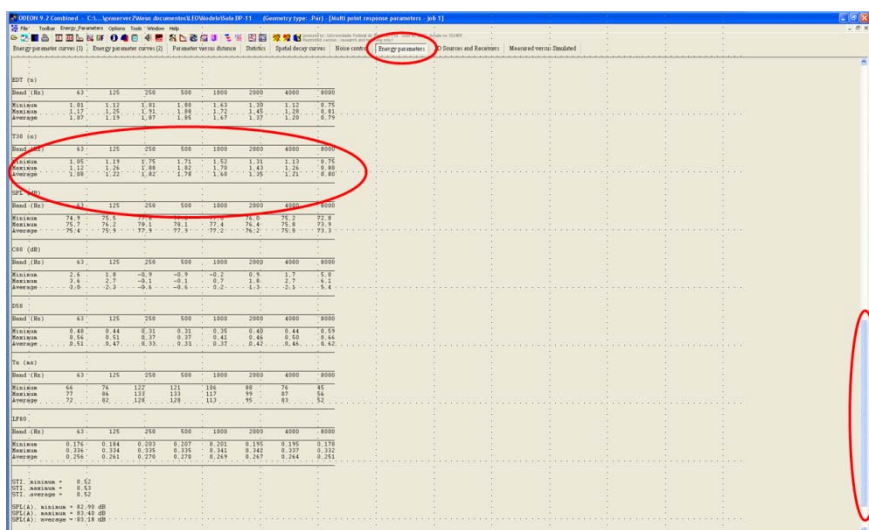


Figura 22 - Resultados dos parâmetros acústicos da sala obtidos através de simulações numéricas realizadas no modelo geométrico.

Com o modelo validado, esse passa a representar o ambiente real, estando apto para que nele sejam feitas simulações diversas e se esperar resultados semelhantes aos obtidos *in loco*, sob as mesmas condições.