

Roberto Outa

**ESTUDO E ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO
ACÚSTICO DO COMPÓSITO DA FIBRA DA CANA**

Ilha Solteira – SP
Julho /2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Roberto Outa

**ESTUDO E ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO
ACÚSTICO DO COMPÓSITO DA FIBRA DA CANA**

Orientador:
Prof. Dr. João Antônio Pereira

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.
Área do conhecimento: Mecânica dos Sólidos.

Ilha Solteira – SP
Julho /2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

O94e	Outa, Roberto. Estudo e análise do coeficiente de absorção acústico do compósito da fibra de cana / Roberto Outa. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2014 70 f. : il. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2014 Orientador: João Antônio Pereira 1. Acústica. 2. Impedância acústica. 3. Coeficiente de absorção acústica. 4. Ondas estacionárias. 5. Reflexão e transmissão em um meio. 6. Função de transferência. 7. Movimento harmônico.
------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo e análise do coeficiente de absorção acústico do compósito da fibra da cana

AUTOR: ROBERTO OUTA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: MECANICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. FABIO ROBERTO CHAVARETTE
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ADAILTON SILVA BORGES
Câmpus de Cornélio Procopio / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Data da realização: 25 de julho de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico os conhecimentos adquiridos e a oportunidade dos meus estudos, até hoje, a minha família Toshiaki Outa, Kiyoco Tanimoto Outa, Sara Outa Hayashi, Ricardo Seiji Hayashi, Rodrigo Hayashi, Daniele Hayashi, Ricardo Hayashi e ao Garu.

“A severidade da vida nos torna mais humilde em nossos atos e decisões”.

Obrigado!

AGRADECIMENTOS

Acredito que esta seja uma das partes mais difíceis de escrever em um trabalho, pois são tantas as lembranças de amigos, colegas, professores e até de pessoas distantes que, sem bem nos conhecer, nos desejam felicidades e sucesso.

Inicio agradecendo a Deus e “aos que me protegem” pela saúde, oportunidade de estudar, e do conhecimento adquirido até então.

Agradeço a vida, ao qual me proporcionou dificuldades e facilidades, testes de fé e coragem, e pelo teste de acreditar em mim mesmo, enfim, por me dar a autoconfiança, liberdade e sabedoria para chegar concluso nesta etapa da vida.

Meus agradecimentos ao professor Dr. João Antônio Pereira pela paciência, orientação deste trabalho e principalmente por acreditar na minha pessoa. Ao professor Me. Antônio Eduardo Turra por auxiliar no experimento e nas elucidações dos conceitos acústicos. Ao prof. Dr. Fabio Chavarette pelos ensinamentos computacionais e paciência.

Aos meus amigos e amigas, Álvaro Takei, Valdir Pintanel, Silvair Pintanel, Cleide Yamaguchi, Yolanda Yamaguchi, Celso Itsuzaki, Ruy Carneiro, Clemilde Pintanel que sempre me acompanham em dias bons e ruins. A amiga Heloisa Fonseca Marão por participar intensamente da minha vida. Ao amigo e companheiro de jornada acadêmica Claudio Basquerotto.

Meus agradecimentos aos colegas de pós-graduação, e aos colegas que contribuíram auxiliando no desenvolvimento do compósito, Hildo Costa de Sena, Fabiana Canola Mari e Breila Pessoa Dias.

Meu obrigado a Marta, Cristiane e Neide, atuantes na biblioteca da UNESP FEIS, pessoas maravilhosas que me ajudaram contribuindo com conhecimentos e palavras de apoio.

Obrigado !

RESUMO

O objetivo motivacional deste trabalho é estudar a possibilidade de desenvolvimento de um material a base de bagaço de cana com um maior valor agregado, propondo assim, outra função e/ou utilização para o bagaço da cana de açúcar. Para isso, foi desenvolvido um aglomerado de fibra de cana (compósito) com diferentes proporções de fibra de cana e aglutinante, e posteriormente foram estudadas algumas características acústicas destes diferentes compósitos, avaliando assim, o potencial de uso da fibra como material de absorção acústica. Os coeficientes de absorção acústica do aglomerado foram estimados com base na teoria e conceitos de acústica utilizando o tubo de impedância, tendo como base a norma ISO10534-1(1996). Os resultados obtidos do coeficiente de absorção acústica dos compósitos analisados mostraram que a fibra da cana pode ser utilizada como um material de absorção acústica, dependendo da composição do compósito, o mesmo se mostrou equivalente a alguns materiais do mercado de absorvedores acústico.

Palavras-chave: Acústica. Tubo de impedância. Coeficiente de absorção acústica. Ondas estacionárias. Reflexão e transmissão em um meio. Função de transferência. Movimento harmônico simples - MHS.

ABSTRACT

The motivational goal of this work is to study the possibility of developing a material basis of bagasse with a higher added value, thus suggesting another function and / or use for bagasse from sugar cane. For this, we developed a cluster of sugarcane (composite) with different proportions of sugar and binder fiber and fiber were subsequently studied some acoustic characteristics of different composites, thus assessing the potential use of fiber as sound absorption material. The sound absorption coefficients of the cluster were estimated based on the theory and concepts of acoustic, using the impedance tube, based on the standard ISO10534-1 (1996). The results of the sound absorption coefficient of the analysis showed that the composite fiber rod can be used as an acoustic absorption material, depending on the composition of the composite, it was equivalent to some of the noise absorbing materials market.

Keywords: Acoustic. Standing wave tubes. Absorption coefficient acoustic. Standing waves. Noise. Harmonic Movement Simple – HMS. Density. Transfer function, reflexion and transmission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Divisão das áreas de conhecimento dentro dos grupos de atuação	17
Figura 2	Variação das pressões no ar através da oscilação do diapasão.....	21
Figura 3	Ambiente sendo excitado por uma fonte qualquer a um instante t	21
Figura 4	Área em formato de cubo, composto por moléculas, cujo cubo se encontra sobre a ação de uma pressão	23
Figura 5	Pressões incidentes e refletidas no meio I, e a pressão transmitida no meio II, cuja impedância é diferente nos dois meios	30
Figura 6	Onda estacionária na amplitude máxima, com pressão $2A_i$ na superfície.....	31
Figura 7	Onda estacionária na amplitude mínima, com pressão nula na superfície.....	32
Figura 8	Material poroso do lado esquerdo espuma reticulada e do lado direito espuma reticulada de plástico	35
Figura 9	Material fibroso, do lado esquerdo fibra de vidro e do lado direito lã mineral	36
Figura 10a	Máquina desfibriladora	38
Figura 10b	Máquina desfibriladora em detalhe dos discos de desfibramento	38
Figura 11	Compósito de fibra da cana na forma cilíndrica	39
Figura 12	Compósito de fibra da cana mesh12, mesh24, e ambas mesh12 e 24	41
Figura 13	Uso dos microfones em diferentes aplicações	43
Figura 14	Experimento do tubo de impedância e o comportamento da onda estacionária internamente ao tubo	44
Figura 15	Distancia entre a referencia e a pressão mínima	47
Figura 16	Desenho esquemático da montagem do experimento de bancada – tubo de impedância	48
Figura 17a	Equipamento do experimento do tubo de impedância	49
Figura 17b	Tubo de impedância com alto falante e o material de teste	49

Figura 17c	Tubo com metal	50
Figura 17d	Tubo com compósito	50
Figura 17e	Fonte sonora com vedação	50
Figura 18	Experimento do tubo de impedância e as escalas de medição.....	53
Figura 19	Valores medidos de pressão sonora do modelo experimental.....	55
Figura 20	Compósito da fibra da cana	57
Figura 21	Representação esquemática do tubo de impedância	57
Figura 22	Valores de pressão sonora do compósito da fibra da cana mesh24 com cola branca.....	58
Figura 23	Valores de pressão sonora do compósito da fibra da cana mesh12 com cola branca.....	59
Figura 24	Valores de pressão sonora do compósito da fibra da cana mesh12 e mesh24 com cola branca	60
Figura 25	Valores de pressão sonora do compósito da fibra de cana de mesh24 com cola sintética (0.4g de cola sintética).....	61
Figura 26	Valores de pressão sonora do compósito da fibra de cana de mesh24 com cola sintética (0.2g de cola sintética).....	62
Figura 27	Valores do coeficiente de absorção sonora dos diferentes componentes da fibra da cana	63
Figura 28	Comparação do coeficiente de absorção acústica da fibra da cana e de outros materiais	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tabela com valores de coeficiente de absorção sonora de diferentes materiais.....	37
Tabela 2	Coeficiente de absorção sonora de materiais porosos e fibrosos encontrados em mercado.....	37
Tabela 3	Compósito da fibra da cana	40
Tabela 4	Posição dos pontos de pressão mínima no interior do tubo	52
Tabela 5	Comparação da posição dos pontos de pressão mínima	56
Tabela 6	Coeficiente de absorção sonora do compósito da fibra da cana.....	63
Tabela 7	Comparação entre os coeficientes de absorção sonora dos compósitos de fibra da cana	64

LISTA DE SIMBOLOS

f	Frequência
Hz	Hertz
T	Período
ω	Frequência angular
t	Tempo
u	Velocidade da partícula da onda
x	Localização da partícula da onda sonora
λ	Comprimento de onda
k	Número de ondas
ρ_0	Densidade do meio em equilíbrio
∇	Gradiente ou laplaciano
c	Velocidade do som
A	Amplitude da onda incidente
B	Amplitude da onda refletida
i	Complexo conjugado
j	Complexo conjugado
Z	Impedância acústica
I	Intensidade acústica
P_{max}	Pressão acústica máxima
P_{min}	Pressão acústica mínima
$P(t)$	Pressão acústica ref. tempo
$P_t(t)$	Pressão total ref. tempo
P_a	Pressão atmosférica
P	Pressão total
P_0	Pressão de equilíbrio
γ	Relação dos calores específicos
ρ	Densidade do meio
u_x	Velocidade no eixo x
u_y	Velocidade no eixo y
u_z	Velocidade no eixo z
$u_{\acute{a}gua}$	Velocidade do som na água

$u_{\text{sólido}}$	Velocidade do som no sólido
u_i	Velocidade incidente
u_r	Velocidade reincidente
$u_{\text{sensação}}$	Unidade de sensação
W	Potencia sonora
W_0	Potencia sonora de referencia
P_e	Pressão efetiva acústica
IL	Intensidade logarítmica
NPS	Nível de pressão sonora
E_k	Energia cinética
E_p	Energia potencial
E	Densidade de energia acústica
ε_i	Densidade de energia instantânea
V_0	Volume
R_{coef}	Coeficiente de reflexão
T_{coef}	Coeficiente de transmissão
r_1	impedância acústica no meio 1
r_2	impedância acústica no meio 2
P_i	Pressão incidente
P_r	Pressão reincidente ou refletida
P_t	Pressão transmitida
α	Coeficiente de absorção sonora
ROE	<i>Razão das ondas estacionárias</i>
E_{abs}	Quantidade de energia instantânea absorvida
E_{inc}	Quantidade de energia instantânea incidente
I_a	Intensidade acústica absorvida
I_i	Intensidade acústica incidente
I_r	Intensidade acústica reincidente
f_0	Frequência de referência
f_c	Frequência de corte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	TEORIA E FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA	16
2.1	História da acústica.....	16
2.2	Som e ruído.....	18
2.3	Propagação do som e pressão sonora.....	19
2.4	Ondas acústicas	22
2.4.1	<i>A equação do estado para gases.....</i>	<i>22</i>
2.4.2	<i>A equação da continuidade e conservação de massa</i>	<i>23</i>
2.4.3	<i>A equação de Euler</i>	<i>24</i>
2.5	A equação da onda linear acústica.....	25
2.6	Velocidade de propagação sonora nos fluidos	26
2.7	Nível de pressão sonora e intensidade acústica	27
2.8	Densidade de energia acústica	27
2.9	Impedância acústica	28
2.10	Reflexão e transmissão de um meio.....	29
2.11	Coeficiente de absorção sonora	32
2.12	Frequência de corte e comprimento de onda	33
3	MATERIAIS DE ABSORÇÃO ACUSTICA, COMPOSITO DA FIBRA DA CANA	34
3.1	Materiais para absorção acústica	34
3.2	Processo de fabricação do compósito da fibra da cana.....	38
3.3	Aspectos do compósito da fibra da cana.....	40
4	ASPECTOS E CARACTERIZAÇÃO DE ENSAIOS.....	42
4.1	Instrumentação para medição acústica	42
4.2	Técnica do tubo de impedância	43
4.3	A norma ISO10534-1(1996)	45
4.4	Simulação e testes preliminares	46
4.4.1	<i>Modelo teórico do tubo de impedância.....</i>	<i>46</i>
4.4.2	<i>Modelo real do tubo de impedância.....</i>	<i>47</i>

5	TESTES EXPERIMENTAIS	51
5.1	Introdução	51
<i>5.1.1</i>	<i>Modelo teórico</i>	<i>51</i>
<i>5.1.2</i>	<i>Testes preliminares</i>	<i>52</i>
5.2	Compósito fibra da cana.....	56
5.3	Comentários e discussões	65
5.4	Conclusões	67
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, sabe-se que o clima e a região favorecem o plantio da cana e a região de São Paulo é atualmente a que mais tem usinas sucroalcooleiras espalhadas por regiões. O bagaço da cana é um subproduto na indústria sucroalcooleira, cujo excesso de estoque do bagaço da cana é prejudicial à usina do ponto de vista de armazenamento e poluição ambiental. Uma das formas de diluir o estoque do bagaço da cana é utiliza-lo como comburente em caldeiras de vapor.

O bagaço da cana tem sido estudado por diferentes grupos de pesquisas acadêmicas, em específico a UNESP campus de São José do Rio Preto – departamento de química tem estudado a extração da lignina do bagaço da cana para a utilização em polímeros, tornando-o este composto um material biodegradável, já outros grupos trabalham qualificando-o para diferentes fins, como a segunda geração da produção de etanol através da degradação da celulose, até na indústria civil, utilizado como agregado (cinza do bagaço da cana) em concretos e argamassas comenta Romel, D.V. et al (2014).

O objetivo motivacional deste trabalho é estudar a possibilidade de desenvolvimento de um novo material a base de bagaço de cana com um maior valor agregado, propondo assim outra função e/ou utilização para o bagaço da cana de açúcar. A solução pensada foi a de desenvolver um material utilizando a fibra da cana que possa ser utilizado como um material de absorção acústica. A proposta deste trabalho é obter o coeficiente de absorção acústica da fibra da cana através da técnica do tubo de impedância.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram estudados e aplicados os conceitos da teoria acústica, procedimentos da norma ISO10534-1(1996) no tubo de impedância, e ainda atividades como a caracterização do experimento, desenvolvimento dos compósitos de fibra de cana, medições das pressões sonoras, e elaboração de algoritmos para os cálculos dos coeficientes de absorção acústica.

Através de pesquisas feitas em revistas e jornais da área acústica, o assunto que contenha somente o compósito da fibra da cana como absorvedor acústico, até então, não foi encontrado. Um trabalho referente desta pesquisa, feita em revistas e jornais da área acústica, comenta que a fibra da cana misturada com madeira sintética é utilizada no mercado de absorção acústica, e foi patenteado com o nome celotex comenta Celotex (1926).

No capítulo dois são tratados os assuntos relacionados à teoria acústica, cujos fundamentos são utilizados na montagem, aplicação e análise dos resultados do experimento. São discutidos ainda as ondas acústicas, velocidade de propagação sonora, intensidade acústica, densidade de energia acústica, impedância acústica e reflexão e transmissão de um meio.

No capítulo três são tratados assuntos de materiais absorvedores acústicos, o processo de fabricação compósito da fibra da cana e seus aspectos.

No capítulo quatro são vistos os aspectos e caracterização dos ensaios, modelos teórico e preliminar, a norma ISO10534-1 (1996), a caracterização do experimento e as medições da pressão sonora para o cálculo do coeficiente de absorção sonora.

No capítulo cinco são tratados os assuntos relativos aos resultados dos experimentos e a conclusão do trabalho.

2 TEORIA E FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA

2.1 Introdução à história da acústica

Nesta sessão o contexto da história da acústica foi conceituado na literatura de Malecki (1969), e comenta detalhes do desenvolvimento da teoria acústica que são descritos desde as épocas do antigo Egito, aproximadamente 3100 a.C., até as grandes guerras, aproximadamente 1945. Em seguida o texto apresentado representa a visão da acústica nos dias atuais do autor deste trabalho.

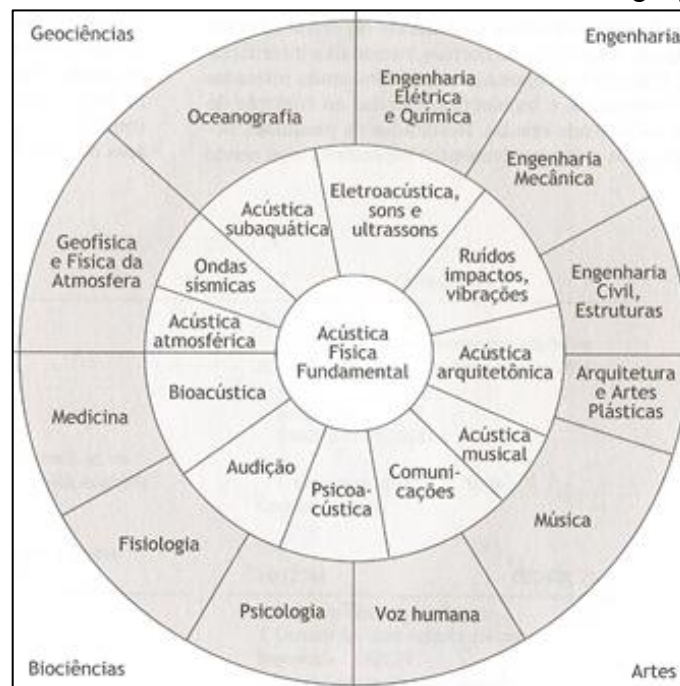
A história da acústica advém de relatos da época do antigo Egito, anterior a 3 100 a.C.. Os primeiros registros sobre acústica ocorreram no período entre 341 a.C. e 335 a.C., quando Aristóteles passava em frente a uma ferraria e observou que o som da batida de diferentes martelos produziam timbres diferentes, e estes sons se propagavam a longas distancias. Os estudos em acústica nesta época foram direcionados para os instrumentos musicais e a audição humana.

A partir do período de Aristóteles (384-322 a.C.) aproximadamente até o período das grandes guerras mundiais (1945), a teoria acústica foi desenvolvida por estudiosos como Galileu, Mersenne e Newton, entre o século XVI e XVII, que investigavam a propagação de ondas sonoras. Já no século XVIII, Young, Fresnel, Fourier, Poisson e Laplace trabalhavam na unificação da teoria acústica, mecânica e termodinâmica. Helmholtz trabalhava na teoria da ressonância mecânica e com a teoria da física acústica no tempo, utilizando as informações da análise harmônica de Fourier. Lord Rayleigh trabalhava na teoria de vibração e propagações de ondas sonoras em espaços livres e ao redor de obstáculos. Euler trabalhou com a teoria de propagação do som, e D'Alembert associa a equação da onda ao movimento da corda. No século XIX, durante o período das grandes guerras, diferentes pesquisas restritas foram desenvolvidas e aplicadas na prática para as ações militares, como a aplicação de ondas ultrassônicas para a medição da profundidade do mar, detecção de icebergs, e pesquisas nas propriedades de diferentes materiais para meios sólidos.

Nota-se que a teoria e os fundamentos da acústica nos dias atuais é composta por uma parte fundamentada na teoria e conceitos da física e a outra na parte matemática. Para Bistafa (2011) a teoria acústica é tratada por grupos como

engenharia, geociências, biociências e artes. Os grupos se subdividem em subgrupos, e enfim, os subgrupos se subdividem em áreas de conhecimento específico. Esta separação é importante, pois caracteriza os limites das áreas de atuação para cada grupo, e faz com que as informações sobre o problema sejam tratadas nas suas áreas com as suas respectivas técnicas e com o uso de equipamentos. A figura 1 mostra a aplicação da acústica, distribuída por grupos engenharia, geociências, biociências e artes, e os subgrupos engenharia elétrica, mecânica e outros, e áreas de conhecimento como eletroacústica, sons e ultrassons, ruídos, impactos, vibrações, entre outros.

Figura 1 – Divisão das áreas de conhecimento dentro dos grupos de atuação.



Fonte: Bistafa (2011, p. 6).

Através desta divisão, diferentes pesquisas científicas são desenvolvidas com foco nas áreas de conhecimentos, o qual os resultados contribuem para o desenvolvimento humano, facilitando o acesso às informações e aprendizado a várias pessoas.

Na natureza encontram-se vários tipos de problemas acústicos, sendo necessário a princípio, um correto entendimento do problema, para assim, ser sugerido o tratamento mais adequado para o problema encontrado. A condição especial e principal na análise do ruído é que o ruído deve ser tratado e não

totalmente eliminado. Existem procedimentos padrões e normativos para aplicações no uso de materiais acústicos, caracterização de experimentos, tabelas normativas, medições, enfim, dependendo do problema, o critério de escolha da norma é fundamental para a solução do problema. Alguns exemplos da aplicação da teoria acústica para a redução do ruído podem ser vistos em nosso cotidiano, como nos veículos de passeio, distintos pela classificação de carros populares, semi luxuosos e luxuosos. Cada classe de veículo tem um tratamento diferente com relação ao ruído e um material diferente para uma aplicação acústica. O exemplo para a atenuação de ruídos nos veículos é feito com o material posto no assoalho que é o feltro fenólico, composta da fibra de algodão, e entre as fibras, é pulverizado epóxi granulado ativado por temperatura alta. No processo de fabricação, entre as duas camadas de feltro fenólico é disposto uma película de polietileno fina, formando um *sandwich*. Este *sandwich* tem a função de atenuação acústica e vibracional. Na área da saúde, existem exemplos do uso da teoria acústica, com equipamentos específicos de ondas ultrassônicas, cujas máquinas são desenvolvidas especificamente para diagnosticar tratamentos corretivos ou preventivos em seres humanos e animais; eliminação de sujeiras na superfície dos dentes; até o monitoramento cardíaco como o *ecodopler*.

Entretanto deve-se considerar que na natureza existem problemas adversos, cuja resolução não se obtém através dos estudos de uma única área de conhecimento. Com isso, é importante a união de diferentes pessoas com conhecimentos específicos distintos para uma solução, constituindo assim, a multidisciplinaridade ou interdisciplinaridade.

Na sequência são tratados os assuntos relacionados à teoria e os conceitos de acústica, e discutidos ainda ondas acústicas, velocidade de propagação sonora, intensidade acústica, densidade de energia acústica, impedância acústica e reflexão e transmissão de um meio.

2.2 Som e ruído

A palavra acústica, o que denota a ciência de som, tem sua origem etimológica na palavra grega *akouein*, que significa ouvir, segundo Enflo e Hedberg

(2004). A ciência acústica trata dos assuntos relacionados à produção, transmissão e recepção sonora, e a percepção do som.

Diferentes autores como Gerges (2000), Kinsler et al. (1999) e Crocker(2007) explicam o som e ruído distintamente, sendo por significado físico, matemático, definições relacionadas à audição e entre outras.

A princípio, uma forma de fácil entendimento é relacionar o som a audição humana, e ao se escutar algo, o som é definido como uma sensação melodiosa e harmônica, enquanto o ruído, uma sensação incomoda e irritante. A sensação de se ouvir, para o ser humano, advém da pressão sonora em uma frequência de 20Hz a 20KHz comenta Bistafa (2011).

Na acústica é importante entender a fonte de emissão sonora e classificar a qualidade destes sons ou ruídos para que possam ser tratados e até mesmo isolados. Os sons e ruídos são gerados por diferentes tipos de fontes sonoras, oriundos da natureza, do homem, de máquinas e equipamentos criados pelo homem, meios excitados propositadamente, entre outros.

2.3 Propagação do som e pressão sonora

Autores como Gerges (2000), Kinsler et al. (1999) e Crocker (2007), definem que o som é um movimento oscilante das partículas, resultante da variação da pressão em um meio fluídico, cuja representação gráfica é o resultado da aplicação de uma equação senoidal no tempo. No meio fluídico, as variações das pressões máximas e mínimas, são chamadas de picos e vales, ou, compressões e rarefações, respectivamente.

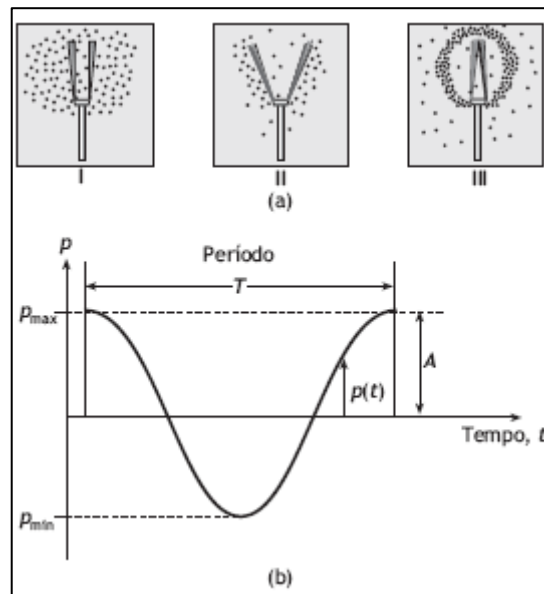
Portanto, o som é interpretado como uma onda sonora ou onda acústica, cuja à propagação da onda sonora é o resultado da transferência de energia do choque sucessivo entre as partículas no meio fluídico, alterando a sua densidade. A onda sonora é considerada uma onda mecânica, pois tem relação direta com as leis de Newton. Considerando os atritos inerentes ao trajeto, esta energia se dissipa ao longo do tempo, limitando a propagação da onda a uma determinada distancia.

Em ambientes abertos a onda de pressão sonora se propaga em forma esférica, a partir de uma fonte pontual, e durante a trajetória são encontrados diferentes tipos de obstáculos que dificultam a propagação desta onda sonora. Esta

onda sonora esférica irradia-se na sua trajetória em várias direções, já para as ondas sonoras que se propagam internamente aos tubos, estas são chamadas de ondas sonoras planas unidimensionais, tem o mesmo sentido e direção de propagação da onda, conforme Gerges (2000). Os obstáculos podem ser considerados uma não uniformidade do meio, causada por ventos e/ou gradientes de temperaturas, barreiras sonoras compostas de diferentes tipos de materiais, variação de densidade do meio, e variação de volume, entre outras.

Bistafa (2011) demonstra o comportamento da pressão sonora em um meio fluídico (ar) a partir da excitação de um diapasão. Na figura 2a, no quadro I, o comportamento do meio fluídico em um ambiente inicialmente em repouso conjuntamente com o diapasão estático; no quadro II, é demonstrado que o meio fluídico tem as moléculas em início de agitação, excitado pelo diapasão; no quadro III, é demonstrado que o meio fluídico está inteiramente agitado e as suas moléculas reunidas em torno do diapasão. Esta condição progressiva da figura 2a, através dos quadros I, II e III, mostra o comportamento das moléculas, consequentemente, a troca de energia através de choques sucessivos entre essas moléculas, cuja pressão sonora é composta de variações máximas e mínimas, e variações de densidade em um dado período. A representação gráfica que demonstra o comportamento do meio fluídico condizente com a onda de propagação sonora, dado pela agitação das moléculas representadas nos quadros I, II e III, já relatados, está na figura 2b, o qual a pressão sonora tem amplitude máxima (P_{max}) e mínima (P_{min}) em um período T , sendo $p(t)$ a pressão dada a um instante qualquer.

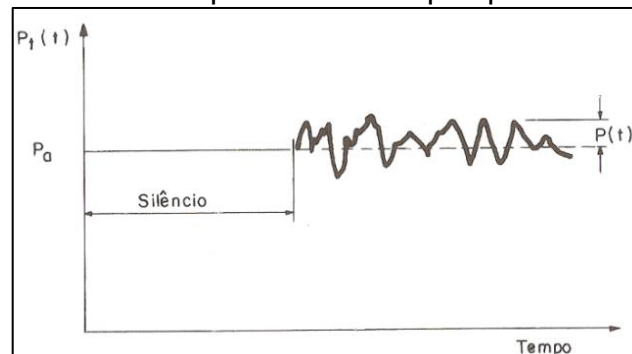
Figura 2 – Variação das pressões no ar através da oscilação do diapasão



Fonte: Bistafa (2011, p. 19)

Gerges (2000), através da figura 3, apresenta um gráfico do comportamento da pressão sonora em um meio fluídico em dois momentos distintos, o primeiro sem ruído e o segundo excitado em um determinado instante através de um ruído qualquer. No primeiro momento a pressão ambiente P_a está estável e representa a pressão total $P_t(t)$ do ambiente, após um dado instante (t), o ambiente é excitado e o meio fluídico tem uma pressão acústica $P(t)$. O resultado da pressão total no meio fluídico é a soma da pressão ambiente mais a pressão acústica e é representada pela equação $P_t(t) = P(t) + P_a$.

Figura 3 – Ambiente excitado por uma fonte qualquer a um dado instante (t)



Fonte: Gerges (2000, p. 3)

2.4 Onda acústica

Nesta sessão, é dada ênfase na teoria de onda acústica, sendo que nesta introdução é comentada uma sumária definição da teoria de ondas que tem importância na formação da onda acústica, e não será desenvolvido o equacionamento matemático para a equação da onda, e sim, somente escrito a equação da onda.

Autores como King (2009) e Knobel (2000) explicam que a onda pode ser representada através de uma função matemática e tem formato senoidal. Zill (2011) explica que a equação da onda é uma equação diferencial parcial que envolve duas ou mais variáveis independentes e derivadas parciais de uma dada função, sendo descrita como, $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$, o qual $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ representa a segunda derivada parcial da função y no deslocamento x , e $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ representa a segunda derivada parcial da função y no tempo t , e u a velocidade da onda.

As sessões 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3 demonstram a aplicação da equação da onda na teoria acústica, cujo resultado é equação da onda linear. Nesta aplicação, serão utilizados os conceitos da equação do estado para gases, equação da continuidade e equação de Euler.

2.4.1 A equação do estado para gases

A equação do estado é uma relação termodinâmica que relacionam as grandezas termodinâmicas como temperatura, pressão, volume e entropia (energia interna), a matéria. Kinsler et al. (1999) define que os processos acústicos são isoentrópicos, ou seja, adiabáticos e reversíveis, cuja condutividade térmica do fluido e o gradiente ∇ de temperatura do distúrbio são irrelevantes. Através desta condição entende-se que o sistema analisado é isolado de qualquer troca de calor com o meio externo.

Portanto, o comportamento acústico para um gás em um processo adiabático, é descrito como,

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (1)$$

Onde P é a pressão total e P_0 é a pressão de equilíbrio, e ρ_0 a densidade de equilíbrio, e ρ a densidade. A relação dos calores específicos (ou relação de capacidade calorífica) é γ .

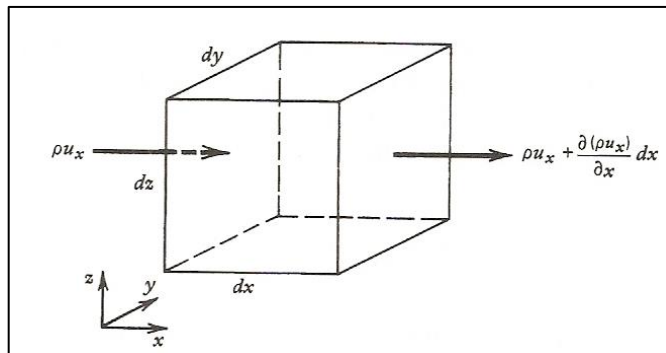
2.4.2 A Equação da Continuidade (Conservação da Massa)

A equação da continuidade é desenvolvida a partir do princípio da conservação de massa, cuja propriedade determina que a massa de um sistema não varie durante a trajetória ao longo do tempo. Admitindo que um fluido escoe em certa direção x e velocidade $\vec{u}$ e em um duto qualquer, adota-se como referencia, no fluido, um cubo de massa m de volume $dV = dx dy dz$, e é menor do que um comprimento de onda. A área em estudo, representada pelo cubo, sofre a incidência da pressão do fluido, e resulta na variação do volume do cubo de densidade ρ . Com a ocorrência da variação do volume deste cubo, a equação resultante desta variação, na direção x , é descrita pela equação,

$$\left[\rho \vec{u}_x - \left(\rho \vec{u}_x + \frac{\partial(\rho \vec{u}_x)}{\partial x} dx \right) \right] dy dz = \frac{\partial(\rho \vec{u}_x)}{\partial x} dV \quad (2)$$

A equação 2, representada na figura 4, demonstra a resultante da variação do volume do cubo na direção x .

Figura 4 - Área em formato de cubo, composto por moléculas, cujo cubo se encontra sobre a ação de uma pressão.



Fonte: Kinsler et al. (1999, p. 117)

Sendo que o cubo tem expressões semelhantes nas direções y e z , a equação 2, é reescrita da seguinte forma,

$$-\left(\frac{\partial(\rho\vec{u}_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\vec{u}_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\vec{u}_z)}{\partial z}\right) dV = -\nabla(\rho\vec{u})dV \quad (3)$$

O sinal negativo na equação é convencionado pela direção do fluxo, o gradiente ∇ é a taxa com que a massa aumenta de volume, e é representado por $\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}\right)dV$, e a velocidade vetorial da partícula é descrita como $\vec{u} = u_x\hat{x} + u_y\hat{y} + u_z\hat{z}$. Portanto, a equação 3 é simplificada matematicamente, e reescrita conforme a equação 4, considerada a equação exata da continuidade, afirma Kinsler et al. (1999). Portanto, tem-se a equação 4,

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}) = 0 \quad (4)$$

Kinsler et al. (1999) afirma que o termo $\rho\vec{u}$ (densidade e velocidade) é uma variável acústica, e considerando que $\rho = \rho_0(1 + s)$, sendo s a condensação de valor muito pequeno e ρ_0 desprezível na função do tempo, a equação 4 é reescrita na forma da equação 5 e considerada como a equação linear da continuidade.

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (5)$$

2.4.3 A equação de Euler

Considerando que na figura 4, o fluido sofre a ação de uma força $d\vec{f} = \vec{a}.dm$, a massa deste fluido, na segunda lei de Newton, terá uma aceleração $\vec{a}$. A força $d\vec{f}$, com viscosidade ausente, na direção x , é escrita através da equação,

$$df_x = \left[\mathcal{P} - \left(\mathcal{P} + \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial x} dx \right) \right] dy dz = \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial x} dV \quad (6)$$

Sendo $\mathcal{P}$ a pressão hidrostática $\mathcal{P} = \vec{f}.A$, e A a área incidente a força. Considerando a força gravitacional oriunda da força na direção vertical, $\vec{g}\rho dV$, a equação 6 é reescrita e o resultado é,

$$d\vec{f} = -\nabla \mathcal{P} dV + \vec{g}\rho dV \quad (7)$$

Quando o fluido se desloca a velocidade $\vec{u} = u_x\hat{x} + u_y\hat{y} + u_z\hat{z}$ na posição x, y e z , após um determinado tempo $t + dt$ a sua localização é descrita como $x + dx, y + dy, z + dz$, e a sua velocidade é representada pela expansão de Taylor. A aceleração do fluido, é representado pela equação

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \quad (8)$$

A equação 7 é reescrita incrementando a equação 8, e assim sendo,

$$-\nabla \mathcal{P} + \vec{g}\rho = \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) \quad (9)$$

A equação 9 é não linear, considerada equação de Euler com gravidade. Considerando que $\vec{g}\rho_0 = \nabla \mathcal{P}_0$, assim $\nabla \mathcal{P} = \nabla p + \vec{g}\rho_0$, portanto a equação 9 é reescrita como, $\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \vec{g}s = (1+s) \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right)$, sendo ρ_0 a densidade de equilíbrio e $\mathcal{P}_0$ a pressão hidrostática de equilíbrio e p a pressão acústica. Assumindo que $|\vec{g}s| \ll |\nabla p|/\rho_0$, sendo $|s| \ll 1$ e $|(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}| \ll \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$, então a equação Euler é reescrita e válida em processos acústicos de pequena amplitude.

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (10)$$

2.5 A equação da onda linear acústica

A equação da onda linear provém dos conceitos aplicados das sessões 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3, e o resultado é a utilização dos equacionamentos resultando em uma única equação diferencial de variável dependente, chamada equação da onda linear afirma Kinsler et al. (1999). Na sequencia, são descritos os detalhes para se obter a equação da onda linear.

Resolvendo matematicamente, a multiplicação da equação 10 pelo gradiente Laplaciano no lado esquerdo e direito, tem-se do lado direito da equação 11 tem-se o Laplaciano tridimensional $\nabla \nabla = \nabla^2$ afirma Kinsler et al.(1999), o resultado será,

$$\nabla \left(\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = -\nabla^2 p \quad (11)$$

Sabendo-se que a pressão $p = P$ é exercida sobre o fluido, e c é a velocidade do som no fluido, a equação da pressão sobre o fluido é escrita como,

$$P = c^2 \rho s \quad (12)$$

Utilizando $\nabla^2 P = \rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$ na equação 11 e trabalhando matematicamente, a equação 11 é reescrita como,

$$\rho_0 \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \nabla \left(\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = 0 \quad (13)$$

Portanto, a equação da onda linear acústica pode ser escrita combinando as equações 12 e 13, e assim, tem-se,

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (14)$$

Segundo Kinsler et al. (1999) a equação da onda plana linear combinando pressão P e deslocamento x é escrita como $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \right) = c^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right)$.

2.6 Velocidade de propagação sonora nos fluidos

A velocidade de propagação sonora é a velocidade da onda que se propaga em um meio fluídico, cuja variação de pressão produz o deslocamento do fluido e consequentemente a alteração da densidade. A velocidade da onda pode ser constante, desde que a fonte emita uma pressão sonora constante e o meio fluídico seja considerado adiabático, caso contrário, à velocidade de propagação da onda não é constante.

Kinsler et al. (1999) define que a velocidade do som u é igual a raiz quadrada da pressão dividida pela densidade do fluido, multiplicada pela relação do calor específico, e é escrita como,

$$u = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \quad (15)$$

Adotando o ar como o meio fluídico de referencia e estabelecer que a temperatura é $t = 0^\circ C$, pressão atmosférica $P = 1.013 \times 10^5 \frac{N}{m^2}$, densidade $\rho = 1.293 \frac{Kg}{m^3}$, a relação de calor específico $\gamma = 1.402$, e o meio fluídico é adiabático; a velocidade do som u , é calculada e o resultado é a velocidade do som no ar c , cujo resultado é,

$$c = \sqrt{\frac{(1.402) \cdot (1.013) \cdot (10^5)}{1.293}} = 331,4 \frac{m}{s} \quad (16)$$

2.7 Nível de Pressão Sonora-NPS e Intensidade Acústica

Na teoria acústica é comum utilizar a notação de medida acústica em escala logarítmica conhecida como nível sonoro ou nível de pressão sonora, cuja razão da utilização desta escala é devido as divergências das pressões sonoras e das intensidades encontradas em um meio, sendo as intensidades audíveis entre 10^{-12} a $10 \frac{W}{m^2}$ explica Kinsler et al. (1999).

A notação da unidade da intensidade sonora, dado em escala logarítmica, é o *decibel* ou *dB*, cuja referencia da unidade foi dado em homenagem a Alexander Graham Bell. A equação 17 representa o nível da intensidade sonora IL , sendo,

$$IL = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (17)$$

Sendo $\log$ a representação logarítmica na base 10, I a intensidade e I_{ref} a intensidade de referência. A intensidade é calculada segundo a equação $I = \frac{P_e^2}{\rho_0 c}$, cujo P_e é a pressão acústica efetiva, afirma Kinsler et al. (1999). O nível de pressão sonora NPS ou *sound pressure level (SPL)*, é uma medida física que caracteriza a intensidade sonora e pode ser calculado através da equação 18, e P_0 a pressão de referência efetiva. Portanto a equação é descrita como,

$$NPS = 10 \log \left(\frac{P_e^2}{P_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{P_e}{P_0} \right) \quad (18)$$

A unidade do NPS é o *dB*.

2.8 Densidade da energia acústica

Pode-se caracterizar a energia acústica como a energia mecânica da oscilação das partículas de um meio fluídico, cuja geração de energia ocorreu devido à pressão acústica. A soma das energias cinética E_k e potencial E_p compõe a energia mecânica, e podem ser escritas como,

$$E_k = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 u^2 \quad (19)$$

A energia potencial E_p , associada à mudança de volume de V_0 para V é

$$E_p = - \int_{V_0}^V p \, dV \quad (20)$$

Kinsler et al. (1999) define a energia acústica total E da onda como sendo,

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 \left[u^2 + \left(\frac{p}{\rho_0 c} \right)^2 \right] \quad (21)$$

E a densidade da energia instantânea tem a unidade em Joules por metro cubico $\left(\frac{J}{m^3} \right)$ é pode ser escrita como,

$$\mathcal{E}_i = \frac{E}{V_0} \quad (22)$$

Considerando que tanto a velocidade quanto a pressão são valores reais obtidos da superposição da onda acústica. A velocidade instantânea e a pressão acústica são funções da posição e do tempo, consequentemente a densidade de energia $\mathcal{E}_i$ não é necessariamente constante por todo o fluido. O tempo médio da energia instantânea é dado pela densidade de energia $\mathcal{E}$ em qualquer local do fluido, define Kinsler et al. (1999). A equação da densidade de energia é escrita como,

$$\mathcal{E} = (\mathcal{E}_i)_T = \frac{1}{T} \int_0^T \mathcal{E}_i \, dt \quad (23)$$

Onde T representa o período de uma onda harmônica, o qual a equação 23 é aplicada para qualquer onda linear acústica.

2.9 Impedância acústica

Para Kinsler et al. (1999) dada a ação de um fluido sobre uma superfície qualquer, a impedância acústica z é a pressão acústica dividida pela velocidade do fluido a superfície de incidência. A impedância z é representada pela unidade $\frac{Pa.s}{m}$ ou $\left(1MKS \, rayl = 1 \frac{Pa.s}{m} \right)$, e pode ser escrita como,

$$z = \frac{p}{u} \quad (24)$$

Autores como Crocker (2007), Kinsler et al. (1999), Gerges (2000) e Bistafa (2011), entendem a impedância acústica como uma onda acústica em um meio, com características específicas e quando passado para outro meio as características do

meio inicial assumem características diferentes no meio secundário. Esta diferença está relacionada à densidade ρ , e a velocidade da onda u dos meios em questão.

Trabalhando matematicamente e substituindo $u = \frac{p}{\rho_0 c}$, a impedância específica z é chamada de impedância acústica característica do meio pode ser escrita conforme a equação 25, cujo sinal depende da direção de propagação,

$$z = \pm \rho_0 c \quad (25)$$

A impedância acústica para ondas estacionárias é geralmente um complexo conjugado, sendo descrito como,

$$z = r \pm jx \quad (26)$$

Cujo r é a resistência acústica e jx é a reatância específica complexa de um determinado meio.

2.10 Reflexão e transmissão de um meio

Para Kinsler et al.(1999) e Gerges (2000) o conceito acústico de ondas de pressão sonora que se propagam em dois meios, demonstra que existem diferentes tipos de situações de reflexão e transmissão de um meio para o outro, através da barreira sonora, na região de contorno. As condições da incidência da onda de pressão sonora na região de contorno são exemplificadas como sendo a reflexão total da onda incidente quando incide no obstáculo que separa os dois meios; a reflexão parcial da onda incidente, sendo uma parte transmitida e outra parte refletida; a transmissão total da onda de pressão sonora incidente no obstáculo. No local de incidência da onda de pressão sonora, de nome região de contorno, são estudados os fenômenos causados por esta onda, cuja energia, desta onda, pode ser ou não dissipada ao longo do seu trajeto, e/ou até mesmo na incidência desta no obstáculo, considerado como impedância acústica.

No meio I, a onda acústica incidente e refletida tem a característica de impedância acústica $r_1 = \rho_1 c_1$, já no meio II, a onda acústica transmitida tem característica de impedância acústica é $r_2 = \rho_2 c_2$.

Considera-se que P_{ia} é a amplitude da onda incidente, e P_{ra} é a amplitude da onda refletida, P_{ta} é a amplitude da onda transmitida, cujas equações das pressões incidentes P_i , refletidas P_r , e transmitidas P_t , são descritas como,

A equação da pressão incidente P_i é,

$$P_i = P_{ia} e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (27)$$

A equação da pressão refletida P_r é,

$$P_r = P_{ra} e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (28)$$

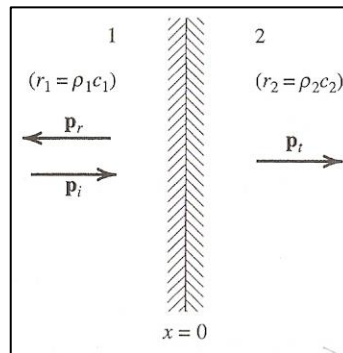
E a equação da pressão transmitida P_t é,

$$P_t = P_{ta} e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (29)$$

O número de ondas no meio I é $k_1 = \frac{\omega}{c_1}$ e no meio II é $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$.

A figura 5 exemplifica a condição de transmissão e reflexão de um meio, considerando o meio I e meio II, cuja região de contorno apresenta a condições de limites¹ em $x = 0$.

Figura 5 – Pressões incidentes e refletidas no meio I, e a pressão transmitida no meio II, cuja impedância é diferente nos dois meios.



Fonte: Kinsler et al. (1999, p. 151)

A pressão e a velocidade normal da partícula no meio I são escritas como $P_i + P_r$ e $(u_i + u_r)\hat{x}$ de modo que nos limites são,

$$P_i + P_r = p_t, \quad \text{para } x = 0 \quad (30)$$

¹ Para Kinsler et al. (1999) as condições de limites são a igualdade da pressão acústica em ambos os lados dos limites, e o componente da força normal da velocidade da partícula de ambos os meios não pode ter nenhuma força resultante do plano que os separem, não existindo a perda de massa.

$$u_i + u_r = u_t, \quad \text{para } x = 0 \quad (31)$$

A impedância acústica específica no limite é representado pela equação,

$$\frac{P_i + P_r}{u_i + u_r} = \frac{P_t}{u_t}, \quad \text{para } x = 0 \quad (32)$$

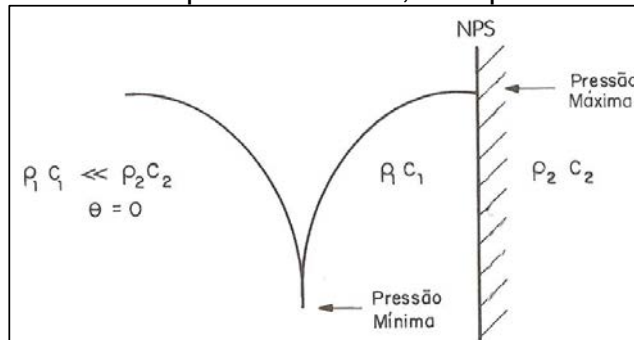
A coeficiente de reflexão R_{coef} e coeficiente de transmissão T_{coef} é escrito como,

$$R_{coef} = \left(\frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} \right)^2 = \left(\frac{\frac{r_2}{r_1} - 1}{\frac{r_2}{r_1} + 1} \right)^2 \quad (33)$$

$$T_{coef} = \frac{4r_2 r_1}{(r_2 + r_1)^2} = \frac{4\frac{r_2}{r_1}}{\left(\frac{r_2}{r_1} + 1 \right)^2} \quad (34)$$

Nos limites, na análise do comportamento da pressão acústica ocorrem duas situações distintas, sendo a primeira situação a razão entre o meio I e o meio II tende a zero ($\frac{r_1}{r_2} \rightarrow 0$), significa que a pressão acústica da onda refletida está em fase com a onda incidente, a pressão acústica é máxima, e a impedância característica do meio II é maior que o do meio I ($r_2 > r_1$), representado na figura 6.

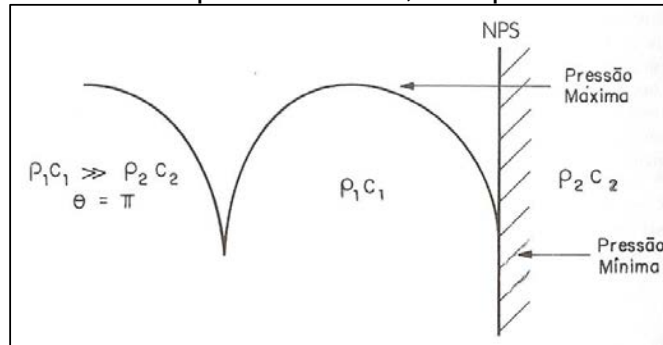
Figura 6 - Onda estacionária na amplitude máxima, com pressão $2A_i$ na superfície.



Fonte: Gerges (2000, p. 193)

Sendo θ o ângulo de fase. Na segunda situação a razão entre o meio I e o meio II tende a infinito ($\frac{r_1}{r_2} \rightarrow \infty$), significa que a onda refletida está fora de fase e com a mesma amplitude da onda incidente, a pressão acústica é mínima, e a impedância característica do meio I é maior que o meio II ($r_1 \gg r_2$), representado na figura 7,

Figura 7 - Onda estacionária na amplitude mínima, com pressão nula na superfície.



Fonte: Gerges (2000, p. 194)

2.11 O coeficiente de absorção sonora

Esta sessão descreve as equações utilizadas para o calculo do coeficiente de absorção acústica. Os resultados das medições das pressões sonoras, utilizando os compósitos de fibra da cana, serão apresentados na conclusão deste trabalho. Gerges (2000) e Crocker (2007) definem que para se calcular o coeficiente de absorção sonora α é necessário anteriormente calcular a razão das ondas estacionárias ROE , seguinte equação,

$$ROE = \frac{A+B}{A-B} \quad (35)$$

O qual ROE é a razão das ondas estacionárias e A é a amplitude da pressão máxima e B é a amplitude da pressão mínima, ambas da onda estacionária. A onda estacionária é formada pela superposição de duas ondas idênticas de sentidos opostos, dada por uma fonte sonora constante, confinadas em um espaço fechado, especificamente um tubo, de extremidades fixas. Na formação da onda estacionária as amplitudes da onda incidente, somam-se com a amplitude da onda reincidente ou refletida formando uma só onda de mesma frequência.

O coeficiente de absorção sonora α é escrito como,

$$\alpha = \frac{4*ROE}{(ROE+1)^2} \quad (36)$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2 \quad (37)$$

Os resultados das equações 36 e 37 são valores que devem estar entre 0 e 1, pois estes valores pertencem a relação de absorção acústica. Calcula-se ainda o

coeficiente de absorção sonora também pela razão da intensidade sonora absorvida I_a , dividida pela intensidade sonora incidente I_i , ou um menos a razão entre a intensidade sonora refletida I_r e a intensidade sonora incidente, e pode ser escrita como,

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i} \quad (38)$$

$$\alpha = 1 - \frac{I_r}{I_i} \quad (39)$$

2.12 Frequência de corte e comprimento de onda

Nesta sessão será feita a introdução qualitativa para a frequência de corte f_c e o comprimento de onda λ , seguido das respectivas equações soluções. Essas equações quando calculadas numericamente, e utilizando os parâmetros deste trabalho, mostrarão as possíveis frequências de uso do experimento tubo de impedância.

A equação da frequência de corte utilizada em corpos cilíndricos, como o caso deste trabalho, é um estudo derivado da acústica de ambientes fechados, cuja geométrica é retangular e apresenta limites de campos sonoros como a câmara reverberante e campo livre em câmara anecóica, segundo Gerges (2000). Matematicamente a frequência de corte é o resultado da solução da equação da onda de coordenadas cilíndricas, da aplicação da função de Bessel, cujo resultado é escrito como,

$$f_c = \frac{1,84 c}{\pi d} \quad (40)$$

Sendo c é a velocidade de propagação do som no ar, d é o diâmetro do cilindro. Considerando que uma onda senoidal em movimento harmônico é a representação gráfica de uma forma de onda, a distância entre duas amplitudes sucessivas, é chamado comprimento de onda. Portanto, o comprimento de onda é a distancia que se repete sucessivamente da forma da onda ao longo do tempo, afirma King (2009). O comprimento de onda é escrito como,

$$\lambda = u.T = \frac{c}{f} \quad (41)$$

Sendo, u a velocidade, T o período, e f a frequência da onda.

3 MATERIAIS DE ABSORÇÃO ACÚSTICA, COMPÓSITO DA FIBRA DA CANA

Neste capítulo serão comentados os conceitos de materiais porosos e fibrosos, e relatado o processo produtivo do compósito da fibra de cana.

3.1 Materiais para absorção acústica

O objetivo mais conhecido dos materiais acústico é a absorção do som e ruído, conseqüentemente o seu uso, dado a levar a redução de ruído no ambiente ou mesmo o conforto acústico do ambiente. Alguns materiais utilizados como absorvedores acústicos também tem propriedades de isolamento térmica. Outras funções não menos importantes que a absorção acústica é o isolamento acústico, reflexão e difusão acústica.

Os materiais para aplicações acústicas são diversos, a princípio é necessário o entendimento do comportamento sonoro do ambiente para posteriormente se definir a escolha do material mais adequado ou mesmo uma proposta de projeto de solução do problema.

Os materiais de absorção acústica podem ser classificados em fibrosos, porosos e compósitos, e ainda se considera absorvedores acústicos os ressonadores ou ressonadores de cavidades e as membranas. Os materiais porosos e fibrosos tem característica de absorção acústica distintas, porém ambos são efetivos em alta frequência, já os ressonadores de cavidades são efetivos em médias frequências e por fim as membranas são efetivas em baixas frequências conforme discutido em Kinsler et al. (1999).

Os materiais porosos absorvem a energia acústica incidente que ao entrar pelos poros, se dissipa por reflexões múltiplas e pelo atrito viscoso, transformando-se em energia térmica. Os materiais fibrosos absorvem a energia acústica incidente ao plano de superfície, esta energia acústica ao entrar pelos interstícios da fibra se dissipa através de energia térmica, dado pelo atrito entre as fibras.

A porosidade do material (FAHY, 2005) é definida pela razão entre o volume de espaços vazios pelo volume total ocupado na estrutura porosa,

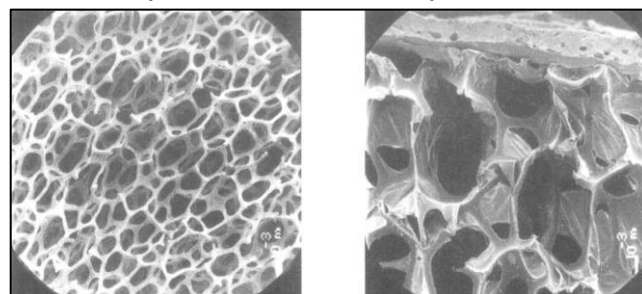
$$porosidade = \frac{vol_{esp\ vazio}}{vol_{esp\ ocupado}}$$

Em geral esses valores são superiores a 0.95 para lãs, vidros, e espuma plástica porosa. Para Delany e Bazley (1970) as fibras de vários materiais de absorção acústica são distribuídas em camadas, provocando anisotropia. No entanto a maioria dos materiais disponíveis para fins práticos são homogêneos. Um parâmetro físico para a avaliação da anisotropia é a resistência a fluxo, o qual tem relação direta e depende da densidade aparente e do tamanho das fibras.

$$anisotropia = \frac{resistencia\ ao\ fluxo}{unidade\ de\ espessura}$$

Devido a complexidade geométrica e estrutural da distribuição das fibras e dos poros do material é difícil desenvolver um modelo teórico do comportamento sonoro nos materiais absorventes. Na figura 8 é mostrado a estrutura do material poroso, sendo que a imagem do lado esquerdo representa a estrutura de uma espuma reticulada de plástico, aumentado 14x, e na imagem do lado direito é mostrado a estrutura de espuma parcialmente reticulada de plástico, aumentado 14x.

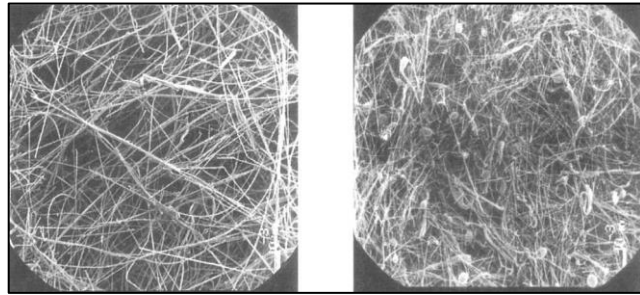
Figura 8 – Material poroso do lado esquerdo espuma reticulada e do lado direito espuma reticulada de plástico.



Fonte: Fahy (2005)

A figura 9 mostra um exemplo de material fibroso, sendo que a imagem do lado esquerdo mostra a estrutura da fibra de vidro, ampliado 14x, e a imagem do lado direito mostra a estrutura da lã mineral de densidade $96 \frac{Kg}{m^3}$, ampliado 14x.

Figura 9 – Material fibroso, do lado esquerdo fibra de vidro e do lado direito lã mineral.



Fonte: Fahy (2005)

Já os ressoadores de cavidades são sistemas formados por cavidades de paredes rígidas e possuem uma abertura estreita, cuja função da cavidade é auxiliar na redução do ruído ou até na eliminação de energia acústica de médias frequências.

A membrana, segundo Kinsler et al. (1999) é uma estrutura plana ou material que separa dois meios fluídicos de mesma característica ou não. Esta é formada por placas sobrepostas uma as outras, formando camadas cuja função é a absorção das ondas sonoras através da vibração das fibras e consequentemente quando o material entra em flexão. Geralmente as placas são de diferentes formatos se adaptando as necessidades de projeto e o material utilizado pode ser a placa de gesso, madeira compensada, madeiras finas, entre outras.

A tabela 1 mostra os valores do coeficiente de absorção sonora de vários materiais. Os coeficientes são obtidos nas frequências de bandas de oitava para diferentes materiais e para os materiais intitulados NRC².

² NRC é a porcentagem média medida de um som absorvido por um material em quatro frequências: 250, 500, 1000 e 2000Hz.

Tabela 1 – Tabela com valores de coeficiente de absorção sonora de diferentes materiais

Tabela de Coeficiente de Absorção Sonora para variados materiais e para materiais comum NRC							
Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC Hz
fibra de vidro (64 kg/m ³) 25mm	0,07	0,23	0,48	0,83	0,88	0,8	0,61
fibra de vidro (64 kg/m ³) 50mm	0,2	0,55	0,89	0,97	0,83	0,79	0,81
fibra de vidro (64 kg/m ³) 100mm	0,39	0,91	0,99	0,97	0,94	0,89	0,95
espuma de poliuretano (celula aberta) 6mm espessura	0,05	0,07	0,1	0,2	0,45	0,81	0,21
espuma de poliuretano (celula aberta) 12mm espessura	0,05	0,12	0,25	0,57	0,89	0,98	0,46
espuma de poliuretano (celula aberta) 25mm espessura	0,14	0,3	0,63	0,91	0,98	0,91	0,71
espuma de poliuretano (celula aberta) 50mm espessura	0,35	0,51	0,82	0,98	0,97	0,95	0,82
feltro de pelo bovino 12mm espessura	0,05	0,07	0,29	0,63	0,83	0,87	0,46
feltro de pelo bovino 25mm espessura	0,06	0,31	0,8	0,88	0,87	0,87	0,72
tijolo fosco	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04
pinturas	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
bloco de concreto pintado	0,01	0,05	0,06	0,07	0,09	0,03	0,07
concreto	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
madeira	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,09
vidro	0,35	0,25	0,18	0,12	0,08	0,04	0,16
placa de gesso	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09	0,07
placa de madeira 10mm	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1	0,11	0,15
bloco de concreto pintado soundblox tipo A (encaixados), 15	0,62	0,84	0,36	0,43	0,27	0,5	0,48
bloco de concreto pintado soundblox tipo B , 150mm	0,31	0,97	0,56	0,47	0,51	0,53	0,63
Jateamento Acustico (sobre o gesso - placa de parede)	0,15	0,47	0,88	0,92	0,87	0,88	0,79
Gesso acústico (25mm espessura)	0,25	0,45	0,78	0,92	0,89	0,87	0,76
Carpete em espuma de borracha	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,55
Carpete em concreto	0,02	0,06	0,14	0,37	0,6	0,66	0,29

Fonte: Adaptado de Crocker (2007, p. 708)

A tabela 2 mostra os valores dos coeficientes de absorção sonoro de alguns materiais fibrosos e porosos encontrados em mercado.

Tabela 2 – Coeficiente de absorção sonora de materiais porosos e fibrosos encontrados em mercado

TABELA 10.1 Coeficientes de absorção sonora de materiais porosos/fibrosos*												
Material					Frequência central da banda de oitava (Hz)						NRC	
					125	250	500	1.000	2.000	4.000		
Fibroso	Isover – Santa Marina Placa de lã de vidro aglomerado	Densidade (kg/m³)	30	Espessura (mm)	25	0,08	0,27	0,50	0,87	0,98	1,04	0,66
					50	0,17	0,62	0,90	1,08	1,07	0,97	0,92
		60	Espessura (mm)	25	0,05	0,27	0,68	0,94	1,03	1,05	0,73	
				50	0,13	0,75	0,96	1,03	0,88	0,96	0,91	
	Thermax – RockFibras Manta de lã de rocha basáltica	Densidade (kg/m³)	32	Espessura (mm)	50	0,35	0,48	0,74	0,88	0,91	0,96	0,75
					100	0,85	0,98	1,10	1,11	1,09	1,18	1,07
		64	Espessura (mm)	50	0,50	0,59	0,91	1,05	1,06	1,06	0,90	
				100	0,87	1,23	1,19	1,15	1,12	1,10	1,17	
Poroso	Espumex – Acústica São Luiz Espuma flexível de poliuretano poliéster incombustível			Espessura (mm)	40	0,06	0,19	0,38	0,52	0,48	0,65	0,39
					60	0,10	0,28	0,49	0,53	0,47	0,82	0,44
					70	0,15	0,42	0,75	0,74	0,66	0,95	0,64
					75	0,15	0,50	0,90	0,99	1,00	1,00	0,85
	Sonex – Illbruck Espuma flexível de poliuretano poliéster (com retardadores de chama) densidade: 32 kg/m³			Espessura (mm)	20	0,04	0,12	0,28	0,44	0,60	0,73	0,36
					35	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89	0,58
					50	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01	0,72
					75	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00	0,89

*Valores indicativos. Utilizar sempre o coeficiente de absorção sonora fornecido pelo fabricante.

*Valores indicativos. Utilizar sempre o coeficiente de absorção sonora fornecido pelo fabricante.

Fonte: Bistafa (2011, p. 247)

Os conceitos para os diferentes materiais, fibrosos, porosos e membranas, foram comentados com o intuito de que a fibra da cana também contenha características similares destes materiais. Neste trabalho de pesquisa, em específico na sessão 3.2, será comentado sobre a fibra da cana e os compósitos da fibra da cana.

3.2 Processo de fabricação do compósito da fibra da cana

O processo produtivo do compósito foi feito seguindo as etapas de preparo da fibra da cana ou desfibrilamento, lavagem, secagem, peneiramento, mistura da fibra com cola, formatação, secagem, separação do compósito. Foram desenvolvidos dois tipos de compósitos, sendo um tipo utilizando a fibra da cana e a adição de cola sintética, cuja composição é solvente, aglutinantes, resinas, borracha e aditivos. No segundo tipo utilizando a fibra da cana e cola branca a base de água.

Na fabricação do compósito da fibra da cana, após a extração do caldo da cana, o bagaço da cana é desfibrilado e submetido a imersão total em água durante 24 horas para a diluição do açúcar e após é submetido a secagem natural ao tempo. O desfibramento é a quebra da fibra em diferentes tamanhos feita por uma máquina trituradora. Na figura 10a é mostrado a máquina desfibradora e na figura 10b é mostrado a máquina desfibradora com o detalhe dos discos de desfibramento.

Figura 10a – Máquina desfibradora.



Fonte: Próprio autor

Figura 10 b – Disco desfibramento.



Fonte: Próprio autor

No peneiramento se determina o tamanho da fibra quebrada e é utilizado um padrão de peneiras com diferentes tramas, ou *mesh*. Neste trabalho os compósitos foram desenvolvidos com as peneiras de tramas *mesh24* e *mesh12*. O *mesh24* tem

a abertura de trama aproximadamente a 0,70 mm e o *mesh12* tem a abertura da trama próxima a 1,68mm.

A mistura da fibra com cola foi feita utilizando uma quantidade mínima de cola, considerando que a quantidade de cola utilizada tivesse a característica somente da ação de fixação das fibras. Neste processo adicionou-se uma pequena quantidade de água para se conseguir a homogeneização da mistura cola e fibra.

A formatação do compósito é a introdução da mistura da fibra com cola em um dispositivo cilíndrico. Esse dispositivo foi preparado de maneira que o formato tenha o mesmo diâmetro interno do tubo de impedância, facilitando assim a condição de encaixe e ajuste no interior do tubo. Outro detalhe foi à padronização da espessura do compósito, o qual se fez pelo dispositivo, e todas as amostras tivessem no máximo 40mm. A figura 11 mostra a mistura fibra e cola dispositivo cilíndrico.

Figura 11 - Compósito de fibra da cana na forma cilíndrica



Fonte: Próprio autor

A secagem do compósito, depois de introduzido no dispositivo cilíndrico, é posto no interior de um forno para a secagem da mistura com temperatura aproximada de 120°C. A exposição do produto no forno durou 24 horas eliminando a água do compósito.

A separação do compósito do dispositivo é a separação física do compósito do dispositivo cilíndrico. Este processo demonstra características distintas quanto a junção das fibras com a cola, um teste simples é pressionar e atritando entre dois dedos o produto (processo manual), se este esfarelar, então se deve refazer a mistura fibra e cola, caso contrário, o produto está em condições para teste no tubo de impedância.

Durante o processo de desenvolvimento das amostras, diferentes amostras de *mesh* desenvolvidas e muitas delas consideradas sem padrão (sem condição de uso), resultando no cancelamento destes compósitos. A tabela 3 apresenta os compósitos considerados com padrão e passíveis de medição, com características de *mesh*, tipo de cola, peso do compósito, peso da fibra e peso da cola.

Tabela 3 – Compósito da fibra da cana

Compósito da Fibra da Cana						
amostra	Mesh	Tipo de Cola	Quantidade de Cola (gramas)	Fibra da cana (gramas)	Espessura (mm)	Peso médio (g)
1	24	sintética	0,4	50	30	85
2	24	sintética	0,2	50	30	80
3	24	branca	0,5	50	40	64
4	12	branca	0,5	50	40	58
5	12 e 24	branca	0,5	50	40	60

Fonte: Dados da pesquisa do autor

3.3 Aspectos do compósito da fibra da cana

A idéia do desenvolvimento dos compósitos baseou-se nas características de quantidade mínima de cola para não gerar interferência na fibra, pois com o excesso de cola a fibra perde a função de absorção da energia e a dissipação pela vibração. Ainda no desenvolvimento do compósito priorizou-se a padronização da quantidade de fibra, o peso da fibra da cana em relação a quantidade de uso, e a espessura do compósito. Neste processo não se utilizou nenhuma técnica estatística para controle de amostragem. A espessura do material nas amostras, utilizando cola branca, foi de 40mm, e para as amostras utilizando cola sintética, foi de 30mm. Essa espessura foi adotada, pois uma espessura inferior a esta tende a esfarelar e o compósito se parte em pedaços. A figura 12 mostra do lado esquerdo o compósito da fibra de cana com *mesh*12 e ao centro o compósito com *mesh*24, e ao lado direito o compósito da fibra com *mesh* 12 e *mesh* 24, todas figuras mostram o

mesmo aspecto visual do compósito da fibra da cana para a cola branca e cola sintética.

Figura 12 - Compósito de fibra da cana mesh12, mesh24, e ambas mesh12 e 24



Fonte: Faculdade de Tecnologia de Araçatuba – FATEC Araçatuba

O compósito da fibra da cana será utilizado no tubo de impedância e é o objeto de estudo desta pesquisa. No capítulo seguinte, serão trabalhadas a caracterização do experimento, e o compósito da fibra da cana será submetido ao ensaio no tubo de impedância, objetivando o resultado do coeficiente de absorção sonora.

4 ASPECTOS E CARACTERIZAÇÃO DE ENSAIOS

Neste capítulo serão tratados assuntos sobre as instrumentações utilizadas na medição, técnica do tubo de impedância, aspectos da norma ISO10534-1 e o modelo teórico e experimental.

4.1 Instrumentação para Medição Acústica

O instrumento de medição acústica é chamado decibelímetro e pode ser portátil ou de bancada, cuja finalidade de uso do aparelho é monitorar e identificar fontes de ruídos e determinar a potência sonora do ambiente. Os equipamentos portáteis são fáceis de transportar pelo peso e tamanho do equipamento e geralmente são robustos a utilização em campo, e os de bancada já são mais elaborados e pesados e também mais sensíveis a intemperes, tendendo a quebra em campo.

Uma boa qualidade das medições pode ser conseguida em ambos os equipamentos, portáteis e de bancada, porém o que define a qualidade de medição são fatores como a precisão do instrumento, interferência de sinais internamente ao aparelho, e os fatores externos como o posicionamento do microfone, qualidade do sinal aquisitados, entre outros.

A acústica de laboratório geralmente é composta de equipamentos como, gerador de funções, amplificadores, fontes de ruídos, diferentes tipos de microfones, caixas de som, osciloscópios e instrumentos de medição, entre outros. O uso desses equipamentos com base (à partir) nas recomendações, e procedimentos normativos, resultam em medições corretas. Nas medições acústicas a escolha do microfone é um fator importante. O microfone de forma simplificada é um sensor de pressão que capta a pressão acústica através de uma membrana e a converte em um sinal elétrico que é medido pelo equipamento de medição acústica.

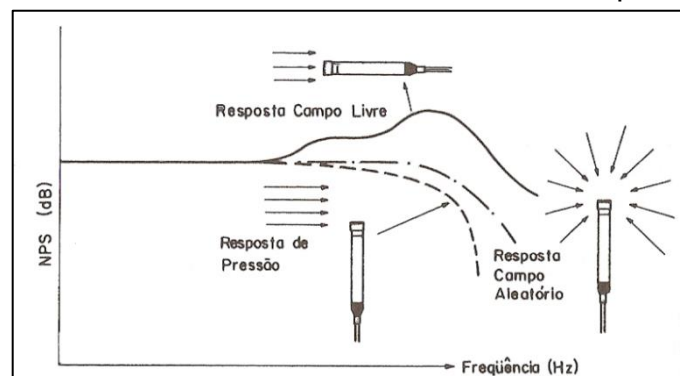
Vários fatores devem ser considerados na escolha do tipo de microfone dependendo do que será medido, ou seja, dependendo da sensibilidade que se deseja medir da pressão sonora as dimensões do diâmetro do microfone se alteram.

As dimensões do diâmetro são de $1''$, $\frac{1}{2}''$, $\frac{1}{4}''$, $\frac{1}{8}''$ e quanto menor o diâmetro, menor é a sensibilidade e mais larga é a sua faixa de frequência, que é, menos diretivo, Gerges (2000). Os microfones, de acordo com Gerges (2000), são classificados em,

- a) Microfone de Incidência Sonora, projetado para responder ao som de incidência aleatória, de todas as direções;
- b) Microfone de Campo Livre, projetado para compensar o distúrbio causado por sua presença no campo sonoro;
- c) Microfone de Pressão, projetado para responder na direção tangencial da membrana, o qual tem resposta plana em frequência incluindo o efeito de sua presença no campo.

A figura 13 mostra a aplicação dos diferentes microfones, a, b e c da descrição anterior, e a sua respectiva eficiência.

Figura 13 – Uso do microfones em diferentes aplicações.



Fonte: Gerges (2000, p. 90)

4.2 A técnica do tubo de impedância

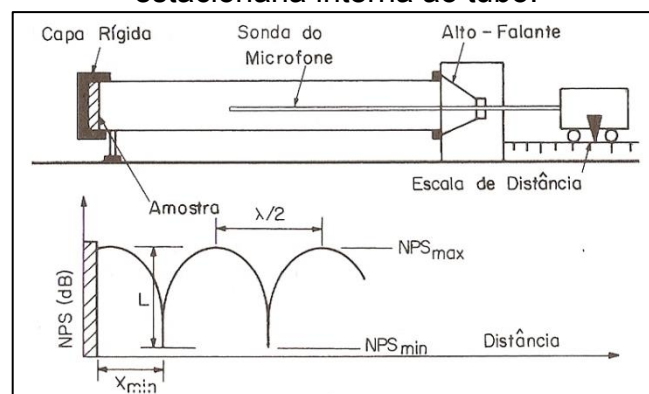
A técnica do tubo de impedância é uma técnica utilizada para medir o coeficiente de absorção sonora e a impedância do material. A técnica do tubo de impedância prevê duas aplicações distintas para a captação da pressão sonora em um tubo de comprimento qualquer, sendo a primeira a mais antiga e a segunda a mais usual. Neste trabalho é utilizada a primeira técnica do tubo de impedância.

A primeira técnica prevê o posicionamento de um alto falante vedado em uma das extremidades do tubo e na extremidade oposta, posiciona-se uma tampa com furo centralizado, com o material acústico fixo na tampa. Através do furo, uma sonda com microfone embutido se movimenta linearmente no interior do tubo, e em

toda a extensão do tubo é captado a pressão sonora. A segunda técnica prevê a mesma condição da primeira técnica nas extremidades do tubo, porém o microfone é posicionado em locais pré-fixados e não se locomove para captar a pressão sonora.

No experimento o resultado da pressão acústica no interior do tubo, dada uma fonte sonora emitindo uma pressão constante, é a somatória das ondas de pressão sonora incidente e reincidente. Como os dois lados do tubo são vedados acusticamente, não existe perda de pressão sonora no fim dos tubos, formando assim a superposição da onda, apresentado na sessão 2.11, cujo resultado é a onda estacionária. O cálculo da frequência de corte f_c , equação 40, utiliza o valor do diâmetro do tubo d e determina o limite máximo da frequência de uso. E o comprimento de onda λ , equação 41, determina outro parâmetro limitador que permite saber se o comprimento de onda é maior que o comprimento do tubo. Os resultados numéricos, da equação 40 e 41, servirão de parâmetros deste trabalho, mostrando as possíveis frequências de uso do experimento tubo de impedância. Na figura 14, a parte superior representa, segundo a norma ISO10534-1(1996), a primeira técnica do tubo de impedância, cuja sonda do microfone se desloca paralelamente ao tubo, medida em uma escala qualquer. Na parte inferior da figura 14, é representado o comportamento da pressão acústica internamente ao tubo e em toda a sua extensão, até a parede de absorção sonora.

Figura 14 - Experimento do tubo de impedância e o comportamento da onda estacionária interna ao tubo.



Fonte: Gerges (2000, p.321)

Observa-se na figura 14 que no fim do tubo a onda estacionária incide no material absorvedor, cujo valor é próximo do nível de pressão máxima. Conforme a absorção acústica, o valor da pressão sonora da onda estacionária varia entre máximo e a mínimo (item discutido na sessão 2.10 - Reflexão e transmissão de um meio), e as posições desses máximos e mínimos são diferentes ao longo do tubo. Essas posições juntamente com os valores são utilizadas para o calculo do coeficiente de absorção sonora.

4.3 A norma ISO10534-1 (1996)

A ISO10534-1 especifica o método para a determinação do coeficiente de absorção sonora, fator de reflexão e impedância de superfície e foi preparada pelo comitê técnico ISO/TC 43, Acústica, subcomitês SC e Construções Acústicas. Esta norma foi dividida em duas partes com o título ***Acoustic-Determination of Sound Absorption coefficient and Impedance in Impedance Tubes***, sendo a parte 1: Método utilizando ondas estacionárias; e a parte 2: Método usando dois microfones. São encontrados ainda os anexos A, B e C na forma integral da ISO10534 e o anexo D é apenas informação.

Na norma ISO10534-1(1996) a determinação do coeficiente de absorção sonora é feita à partir da aquisição da pressão sonora, dada por um microfone e que fatores de reflexão da superfície e a impedância acústica, são importantes aspectos que devem ser analisadas nas ondas estacionárias. Quando a fonte sonora emite uma onda de frequência e pressão sonora constante, internamente ao tubo, ela incide no material a ser analisado e ocorre uma composição da onda de pressão sonora incidente com a onda de pressão sonora reincidente no material do tubo, cuja soma gera a superposição de onda.

No método utilizando dois microfones, norma ISO10534-2(1998), é utilizado a mesma montagem da norma ISO10534-1(1996), porém a diferença é a aplicação de dois microfones para a medição do coeficiente de absorção sonora. Neste método são geradas ondas planas através de uma fonte sonora, e a medição da pressão acústica é feita por dois microfones localizados na transversal do tubo. Após a aquisição da pressão acústica é efetuado o calculo da função de transferência, do

coeficiente de absorção, e por fim das impedâncias acústicas. Este método para a aquisição da pressão sonora é mais rápido, se comparado ao da ISO10534-1(1996).

Neste trabalho utilizou-se a técnica ISO10534-1(1996) pelas limitações dos equipamentos do laboratório de acústica.

4.4 Simulação e Testes Preliminares

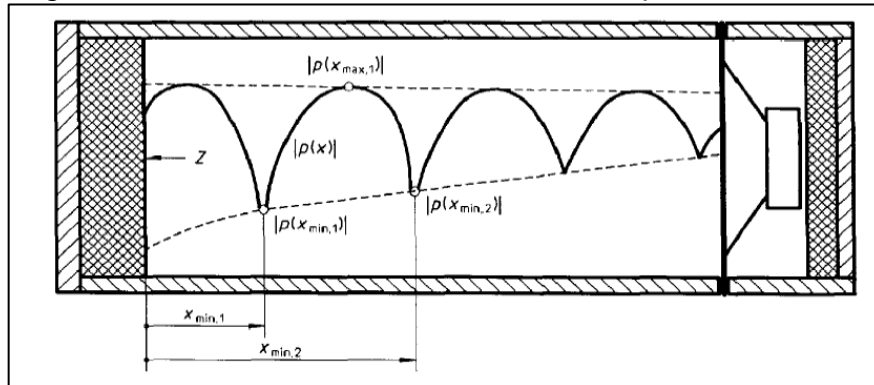
No início, os ensaios foram desenvolvidos como forma de aprendizado e orientação para o entendimento da teoria acústica, e dos testes experimentais, e da metodologia científica usada. Nestes ensaios iniciais foram observados que os resultados eram incoerentes, e a partir desta experiência, foi dada a importância à caracterização do experimento, o qual foi subdividido em modelo teórico de teste e modelo experimental de teste. Após a caracterização do experimento, ocorreu a medição das pressões sonoras para os cálculos do coeficiente de absorção acústica do compósito da fibra da cana.

4.4.1 Modelo teórico do tubo de impedância

Na simulação do modelo teórico do tubo de impedância foi utilizada a teoria de acústica conjuntamente com a norma ISO10534-1(1996), cujo resultado levou a obtenção do comportamento da pressão acústica da onda estacionária no tubo e a localização dos pontos da pressão acústica mínima dada uma referencia.

Na figura 15 é representada a onda estacionária, internamente ao tubo de impedância, e os pontos de pressões máximas e mínimas. Neste caso $x_{min,1}$ é a distancia do primeiro ponto de pressão mínimo em relação ao material, e $x_{min,2}$ é a distancia do segundo ponto de mínimo.

Figura 15 – Distancia entre a referencia e a pressão mínima.



Fonte: ISO10534-1(1996)

Segundo a norma ISO10534-1 (1996) a localização da pressão mínima $x_{min,n}$ é calculada pela equação,

$$x_{min,n} = \frac{(2n-1)\lambda_0}{4}, \text{ para } n = 1, 2, \dots, n \quad (42)$$

Observa-se ainda que na figura 15 que as pressões máximas e mínimas são ligadas por uma linha continua-tracejada que conceitualmente pode ser calculado por uma função envelope. Esta linha tracejada, dada a referencia no material absorvedor, tem direção horizontal, cuja extremidade oposta ao material absorvedor tende ao centro do diâmetro do alto-falante, segundo ISO10534-1 (1996).

4.4.2 Modelo real do tubo de impedância

O modelo do tubo de impedância foi montado no laboratório de acústica de Ilha Solteira - FEIS, e os testes foram realizados com os compósitos de fibra de cana com cola branca e cola sintética. Inicialmente, buscando caracterizar o experimento, os testes foram realizados com uma amostra de metal.

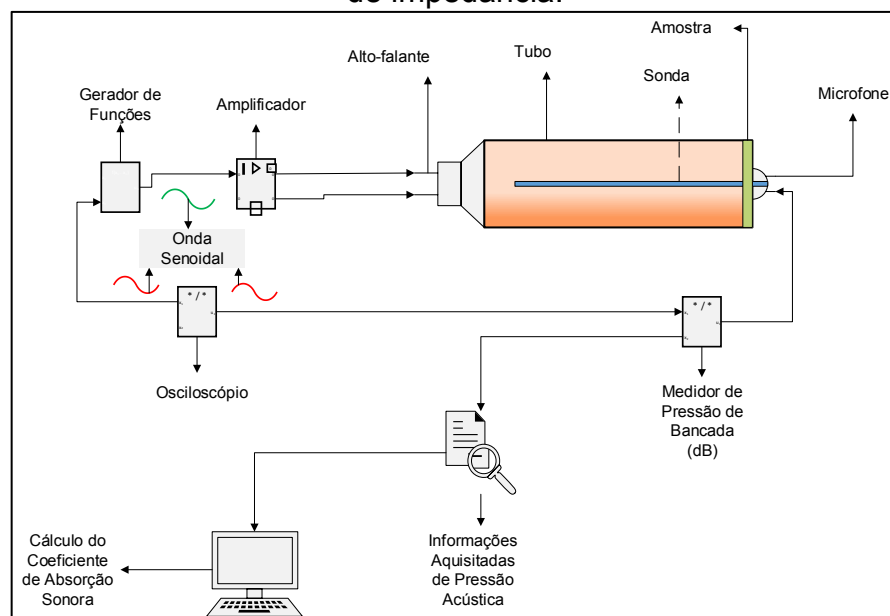
Os principais equipamentos utilizados no experimento foram,

- a. Tubo de PVC (1,0m);
- b. Alto-falante 10A ;
- c. Gerador de Função modelo TR-0458/D;
- d. Amplificador LV103 Laboratório de Acústica;

- e. Medidor de Pressão Sonora (dB) Robotron 00026 (decibelímetro de bancada);
- f. Microfone (sensitividade: 50 mV/Pa, Freq resp: 3.15 Hz to 20 kHz, faixa de pressão sonora: 17 dBA to 134 dB);
- g. Osciloscópio de dois canais;
- h. Cabo flexível conexão LEMO;
- i. Sonda de aço inoxidável;
- j. Amostras;

Na figura 16 é mostrada esquematicamente a montagem do experimento bem como os respectivos equipamentos utilizados.

Figura 16 - Desenho esquemático da montagem do experimento de bancada – tubo de impedância.



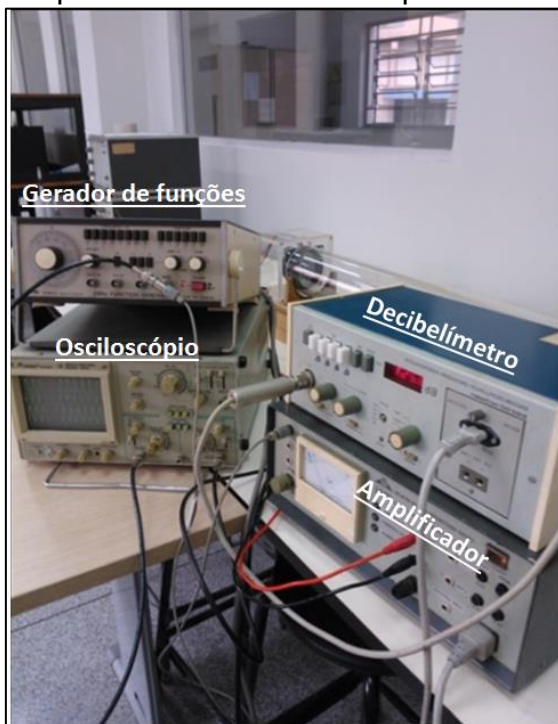
Fonte: Próprio autor

Nos testes para geração do sinal de emissão sonora (fonte) foi utilizado um gerador de função, cujo sinal deve ser constante com uma única frequência, o amplificador e o alto falante. O sinal sonoro no interior do tubo foi coletado com o microfone posicionado em vários pontos, especificamente definidos, de 10mm em 10mm ao longo do tubo utilizando o decibelímetro de bancada (robotron).

O osciloscópio foi usado para manter o sinal do gerador de sinal, bem como o sinal medido no decibelímetro (microfone). Neste caso o osciloscópio foi usado basicamente para certificar a montagem, os sinais medidos no microfone foram analisados qualitativamente e confrontados com o sinal do gerador (senoide). A calibração do sistema foi feita nos microfones para garantir a leitura do sinal.

Na figura 17a, 17b é mostrado o setup experimental dos detalhes dos equipamentos.

Figura 17a – Equipamentos do experimento do tubo de impedância.



Fonte: Laboratório de acústica FEIS

Figura 17b – Tubo de Impedância com alto falante e o material de teste



Fonte: Laboratório de acústica FEIS

A figura 17c, 17d e 17e são mostrados os detalhes da figura 17a e 17b, sendo a 17c a extremidade do tubo com metal, na figura 17d é a extremidade do tubo com o compósito e na figura 17e é mostrado a extremidade com alto falante com vedação.

Figura 17c – Tubo com o metal.



Fonte: Laboratório de acústica FEIS

Figura 17d – Tubo com o compósito



Fonte: Laboratório de acústica FEIS

Figura 17e – Fonte sonora com vedação



Fonte: Laboratório de acústica FEIS

As dimensões e parâmetros do tubo são importantes na definição de limites de utilização do mesmo, visto que elas definem o limite de frequência da onda (máxima e mínima) do experimento. Neste caso as dimensões do tubo utilizado são de 100mm de diâmetro e 1000mm de comprimento. Desta forma, a frequência de corte do tubo, conforme mostrado no item 2.12, pode ser calculado através da equação 40, e a frequência de corte do tubo calculada foi de 2.014Hz. Consequentemente a onda acima deste valor não pode analisada.

5 TESTES EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

Os resultados experimentais se dividem em duas etapas, a caracterização do experimento (tubo de impedância) e a medição dos coeficientes de absorção do compósito da fibra da cana de açúcar.

Na primeira etapa o objetivo foi a caracterização do experimento de forma que qualquer medição oriunda dos componentes e equipamentos estejam padronizadas. Essa primeira etapa foi composta pela estimativa teórica dos pontos de mínimo da onda ao longo do tubo, e dos testes preliminares. A segunda etapa, refere-se aos testes experimentais para a medição do coeficiente de absorção sonora da fibra da cana.

5.1.1 Modelo teórico

O modelo teórico foi desenvolvido utilizando os conceitos de propagação de ondas em dois meios e as suas equações. Os conceitos permitem o estudo e avaliação do comportamento da propagação da onda, neste caso, a onda de pressão sonora no tubo. O outro parâmetro que deve ser verificado é o comprimento do tubo em relação ao comprimento de onda, pois o comprimento do tubo limita a análise das ondas de baixa frequência, visto o comprimento de onda que não pode exceder o comprimento do tubo. Consequentemente ondas de frequência abaixo de 250Hz, ou seja, com comprimento de 1.376mm.

Os resultados dos cálculos do modelo teórico levam a uma avaliação do comportamento da pressão da onda estacionária e a localização dos pontos da pressão acústica mínima no interior do tubo. Neste caso a posição de referencia é a extremidade do tubo oposta ao alto falante. Para o calculo foi utilizado a equação 41 e a tabela 4 mostra os resultados do calculo da localização da posição da pressão mínima no interior do tubo para as frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz.

Tabela 4 – Posição dos pontos de pressão mínima no interior do tubo.

Posição dos pontos de pressão mínima (interior do tubo)					
500Hz		1000Hz		2000Hz	
Ponto Medido	Posição da pressão mínima	Ponto Medido	Posição da pressão mínima	Ponto Medido	Posição da pressão mínima
1	0,172	1	0,086	1	0,043
2	0,516	2	0,258	2	0,129
3	0,860	3	0,430	3	0,215
		4	0,602	4	0,301
		5	0,774	5	0,387
		6	0,946	6	0,473
				7	0,559
				8	0,645
				9	0,731
				10	0,817
				11	0,903
				12	0,989

Fonte: Dados da pesquisa do autor

No caso o tubo de impedância tem o comprimento de 1000 mm e ao longo do tubo, encontram-se três posições de pressão mínima para a frequência de 500Hz, seis posições para a frequência de 1000Hz, e doze posições para a frequência de 2000Hz.

5.1.2 Testes preliminares

A montagem do experimento utilizado no tubo de impedância para o cálculo do coeficiente de absorção do material foi desenvolvida seguindo as normas e procedimentos da norma ISO10534-1(1996).

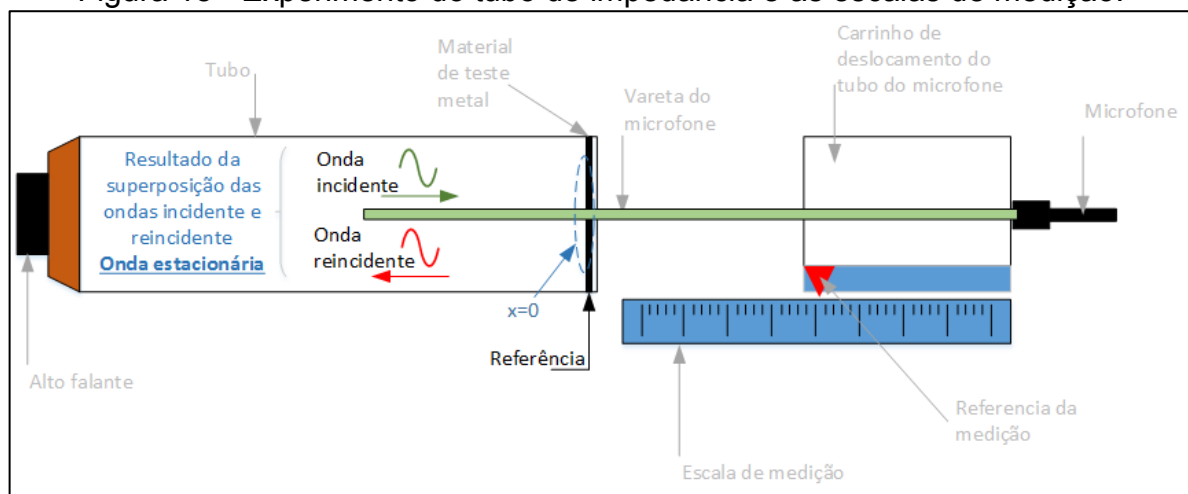
Os testes preliminares foram realizados visando a caracterização do experimento do tubo de impedância.

Neste caso, inicialmente foi utilizado um material rígido (flange de aço) de aproximadamente 2mm de espessura, visto que este material tem a propriedade de refletir praticamente toda a onda incidente, ou seja, no experimento, se todas as condições de montagem estiverem coerentes e os equipamentos funcionando adequadamente, espera-se obter o máximo de reflexão da onda. Portanto, os resultados deste teste, mais especificamente, o comportamento da onda acústica no

interior do tubo e as posições de pontos mínimos poderiam ser analisados e comparados com os valores teóricos obtidos no item 5.1.1 (tabela 4) para uma condição de reflexão total.

No teste o metal rígido foi encaixado dentro da tampa e utilizado um material de vedação (plasticina) no encaixe da tampa para vedar a fuga da onda sonora do tubo. A figura 18 ilustra a montagem do experimento do tubo de impedância, com a escala e a posição de referência de medição.

Figura 18 - Experimento do tubo de impedância e as escalas de medição.



Fonte: Próprio autor

O experimento foi constituído de um alto falante, tubo de impedância, vareta (oca) do microfone, microfone, carrinho que acopla a vareta do microfone com o microfone, escala ou régua de medição, referência ou marcador de medição, material de teste (metal rígido ou flange, compósito de cana).

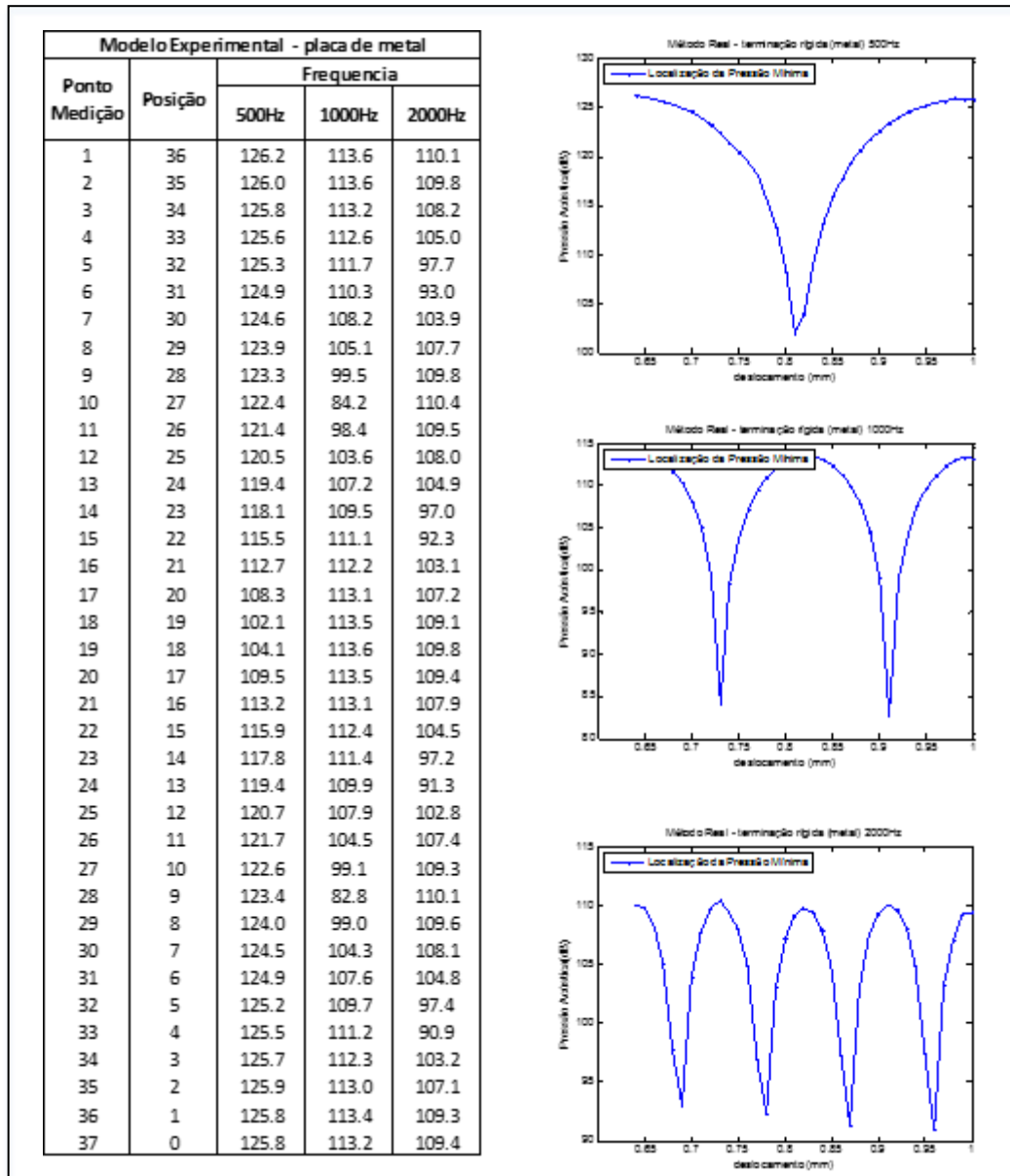
No caso o alto falante emite uma onda sonora constante, cuja onda se propaga internamente ao longo do tubo e incide na parede oposta (metal). No local de incidência ou região de contorno ($x = 0$), ocorre também a reflexão da onda, sendo uma parte da energia da onda retida no material e a outra retorna. A soma das ondas incidente e refletida vai gerar a onda estacionária no interior do tubo.

O experimento consistiu basicamente na medição do valor da pressão acústica em vários pontos no interior do tubo. Para a medida da pressão em cada ponto no interior do tubo foi utilizado uma vareta oca com o microfone acoplado na extremidade oposta e a posição da vareta no interior do tubo era obtida através da

escala. As medições foram feitas em pontos espaçados de 10mm em 10mm, sendo que a vareta acoplada com o microfone no interior do tubo.

No experimento foram utilizadas ondas sonoras de três diferentes frequências, 500Hz, 1000Hz e 2000Hz, mais especificamente, as medidas foram realizadas em trinta e sete pontos iniciando na posição $x=630\text{mm}$, e a cada medida a vareta era recuada 10mm. Na figura 19, do lado esquerdo, mostra a tabela com os valores medidos da pressão sonora para cada ponto. As medidas de pressão sonora foram feitas utilizando a programação do robotron que já é programado e padronizado na produção do próprio equipamento. Na figura 19, do lado direito, são mostrados os gráficos para 500Hz, 1000Hz e 2000Hz de cima para baixo respectivamente, com o comportamento da variação de pressão no interior do tubo, tomando como referencia a extremidade oposta ao alto falante $x=0$.

Figura 19 – Valores medidos da pressão sonora do modelo experimental



Fonte: Dados da pesquisa do autor

Após a medição dos pontos de pressão mínima do modelo experimental deverá ser feito a comparação dos valores teórico e experimental, para que se analise a possibilidade da proximidade entre eles. Os pontos de localização de pressão mínima do modelo teórico têm valores diferentes do modelo experimental, e se compararmos esses pontos de localização entre eles, o resultado deverá ser um valor próximo ou similar. A tabela 5 mostra a comparação dos valores da localização da pressão mínima para as frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz.

Tabela 5 – Comparação da posição dos pontos de pressão mínima

Posição dos pontos de pressão mínima (interior do tubo)								
500Hz			1000Hz			2000Hz		
Ponto Medido	posição da pressão mínima		Ponto Medido	posição da pressão mínima		Ponto Medido	posição da pressão mínima	
	teórico	experimental		teórico	experimental		teórico	experimental
3	0,86	0,81	5	0,77	0,73	9	0,73	0,69
			6	0,95	0,91	10	0,82	0,78
						11	0,90	0,87
						12	0,99	0,96

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Se compararmos os valores das localizações das pressões mínimas de cada frequência percebe-se que existe uma diferença pequena entre elas, e pode ser explicada pela condição de que os cálculos do modelo teórico não tem perda e os resultados são considerados “ideais”, enquanto que no modelo experimental existem perdas no processo (energia no meio viscoso, na incidência da onda de propagação no metal, entre outras). Sendo essas diferenças muito pequenas, o resultado desta comparação demonstra que o experimento está caracterizado e os seus procedimentos corretos.

5.2 Compósitos de fibra de cana

Os testes realizados no item anterior tiveram como intuito maior conhecer as características e a montagem da bancada de teste como um todo e checar o funcionamento do tubo de impedância e respectiva instrumentação para medição do comportamento da pressão acústica no interior do tubo, visando sua aplicação para o cálculo do coeficiente de absorção acústica. Definida a etapa de caracterização do item anterior, foi iniciada a segunda etapa do experimento, cujo objetivo foi determinar o coeficiente de absorção sonora dos diferentes compósitos da fibra da cana.

O *setup* experimental utilizado é o mesmo discutido anteriormente e os testes foram realizados seguindo os mesmos procedimentos adotados nos itens anteriores. A confecção e a composição dos compósitos da fibra da cana foram discutidas no capítulo 3. Os experimentos foram separados em dois conjuntos de amostras do compósito da fibra da cana, sendo as amostras com cola branca e

amostras com cola sintética. Nas amostras com cola branca a pressão acústica no interior do tubo foi medida em trinta e sete pontos, e na cola sintética foram vinte e seis posições, ambas à partir da referência ($x=0$) e espaçadas de 10mm em 10mm.

A figura 20, a mesma que a figura 12, mostra a foto das amostras dos diferentes compósitos de fibra da cana analisados.

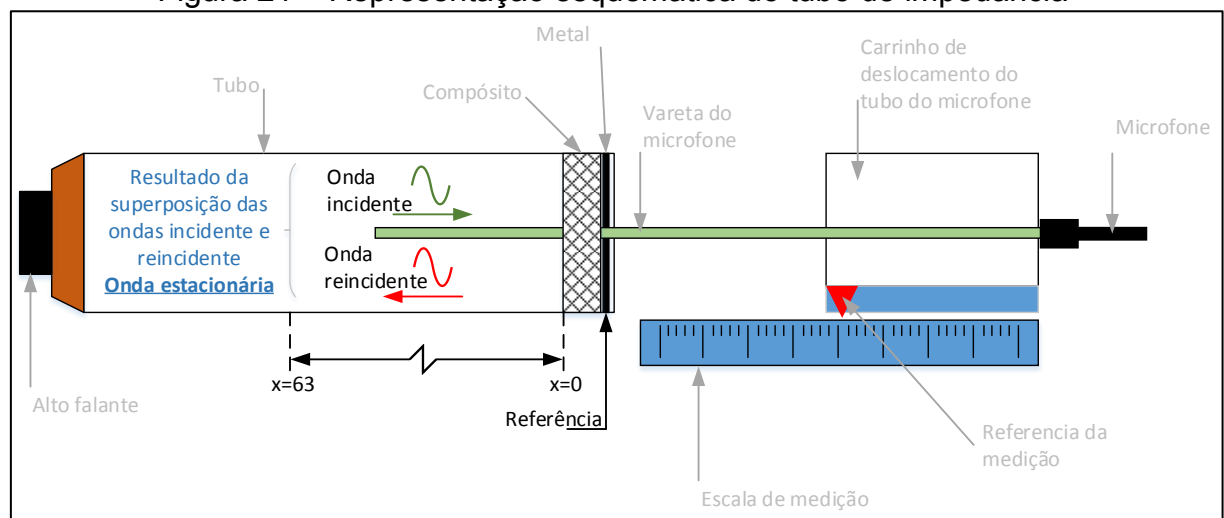
Figura 20 - Compósito de fibra da cana



Fonte: Faculdade de Tecnologia de Araçatuba – FATEC Araçatuba

A figura 21 ilustra esquematicamente o tubo de impedância com a amostra do compósito e a posição de referência de medição

Figura 21 – Representação esquemática do tubo de impedância

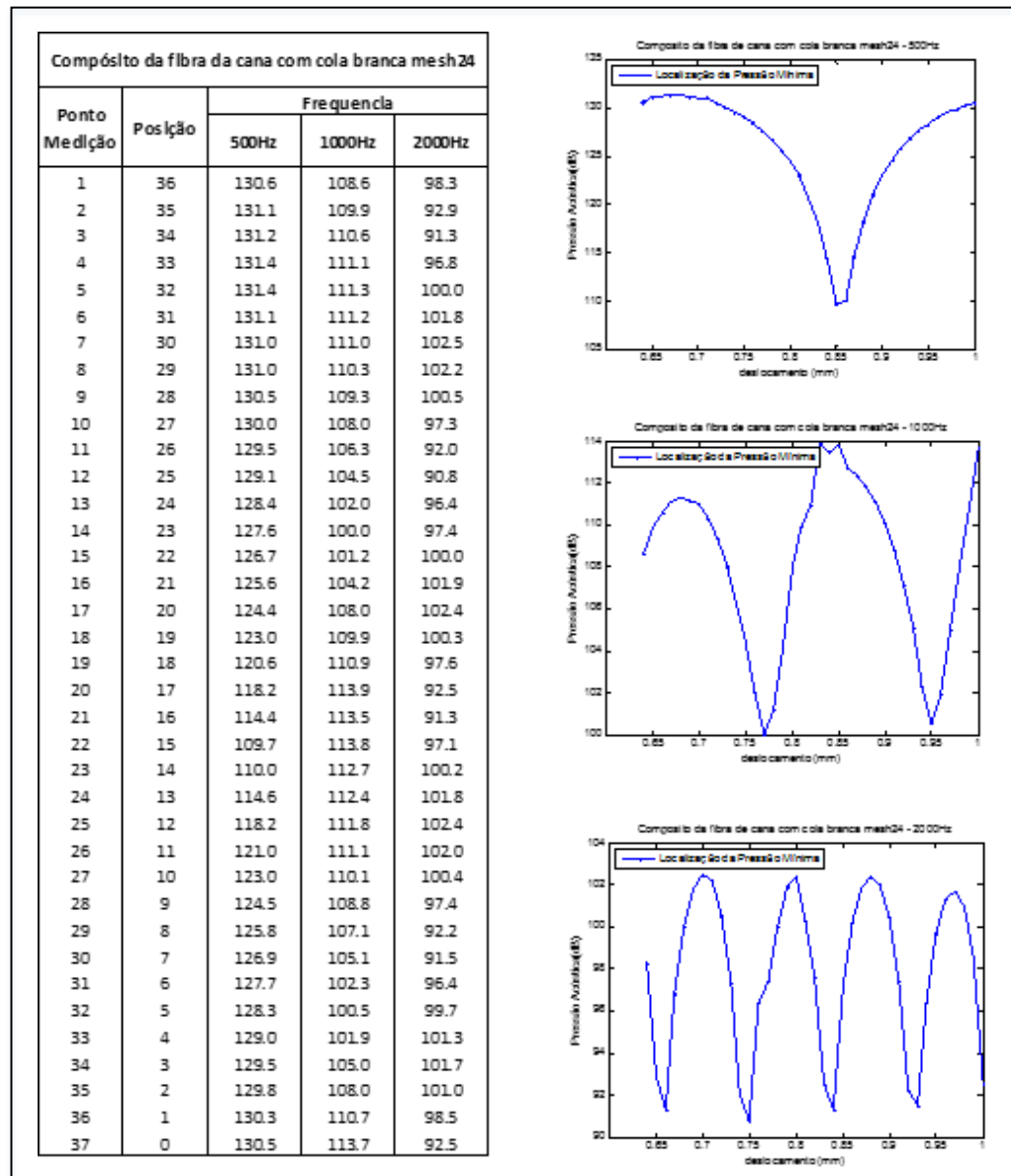


Fonte: Próprio autor

O compósito da fibra da cana foi posicionado na extremidade do tubo junto com a tampa de metal, de forma que, a onda sonora ao incidir no compósito, dependendo da característica do mesmo, pode ultrapassar o material e incidirá na superfície do metal, cuja finalidade, conforme visto no processo de caracterização do

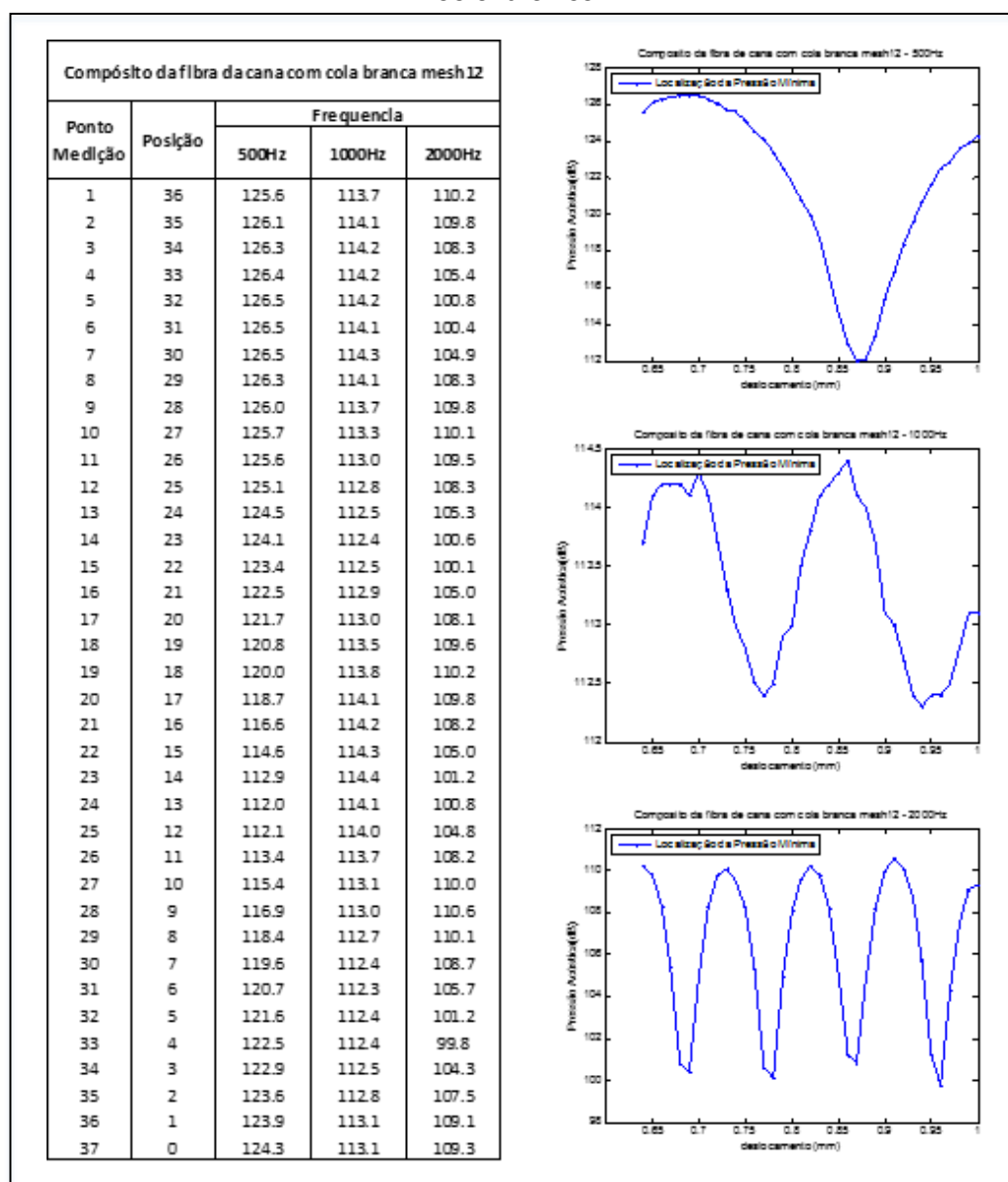
experimento, é a máxima reflexão da onda. Após definida a montagem e checado os equipamentos foi iniciado a realização dos testes. As figuras 22, 23, 24, 25 e 26 de diferentes mesh mostram os valores medidos para os diferentes compósitos analisados, o qual o lado esquerdo de cada figura representa a tabela contendo os pontos de medição e a localização para cada pressão sonora das frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz e o lado direito da figura é a ilustração da forma gráfica das pressões sonoras das diferentes tabelas.

Figura 22 – Valores de pressão sonora do compósito de fibra de cana mesh24 com cola branca



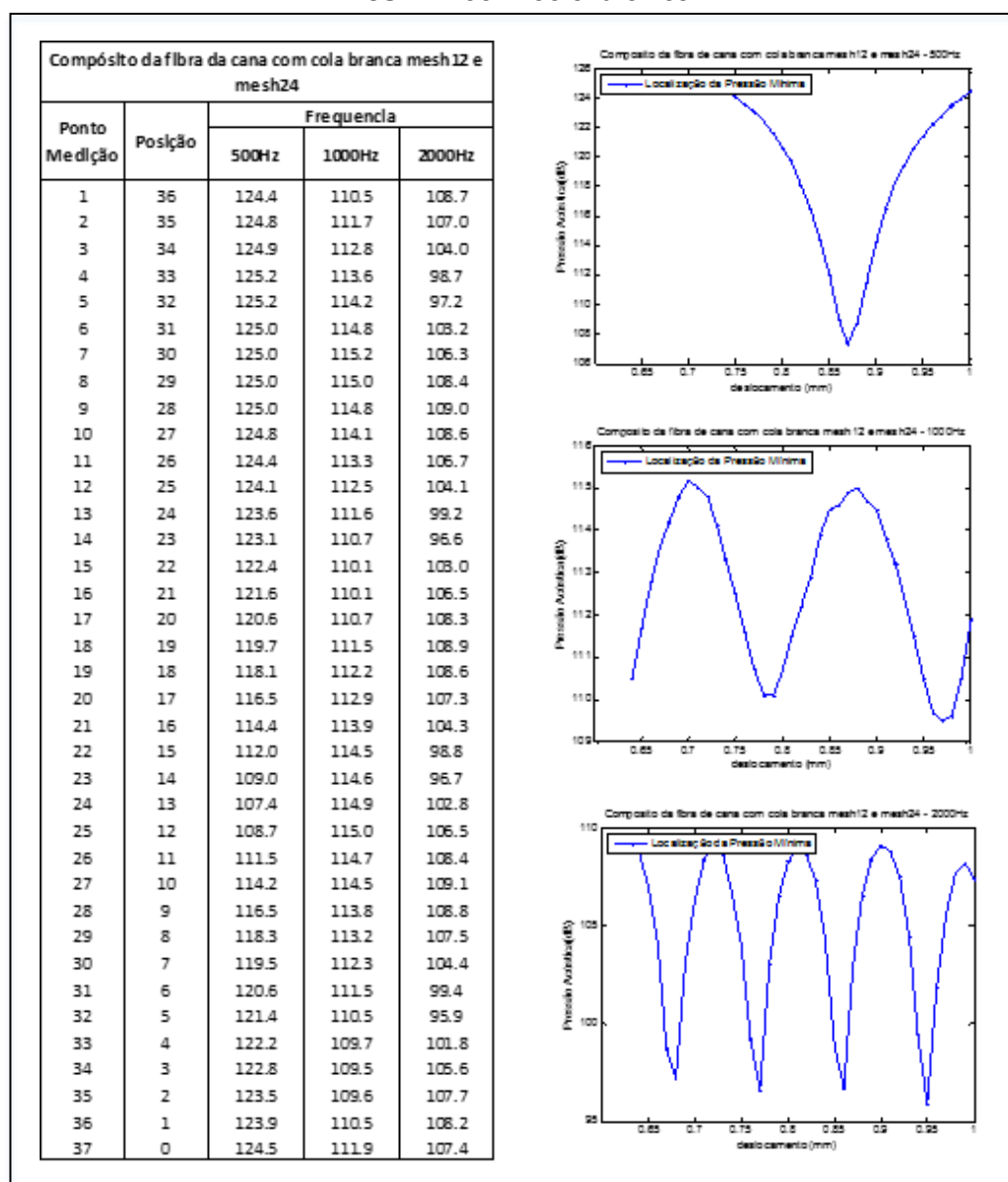
Fonte: Dados da pesquisa do autor

Figura 23 – Valores de pressão sonora do compósito de fibra de cana mesh24 com cola branca



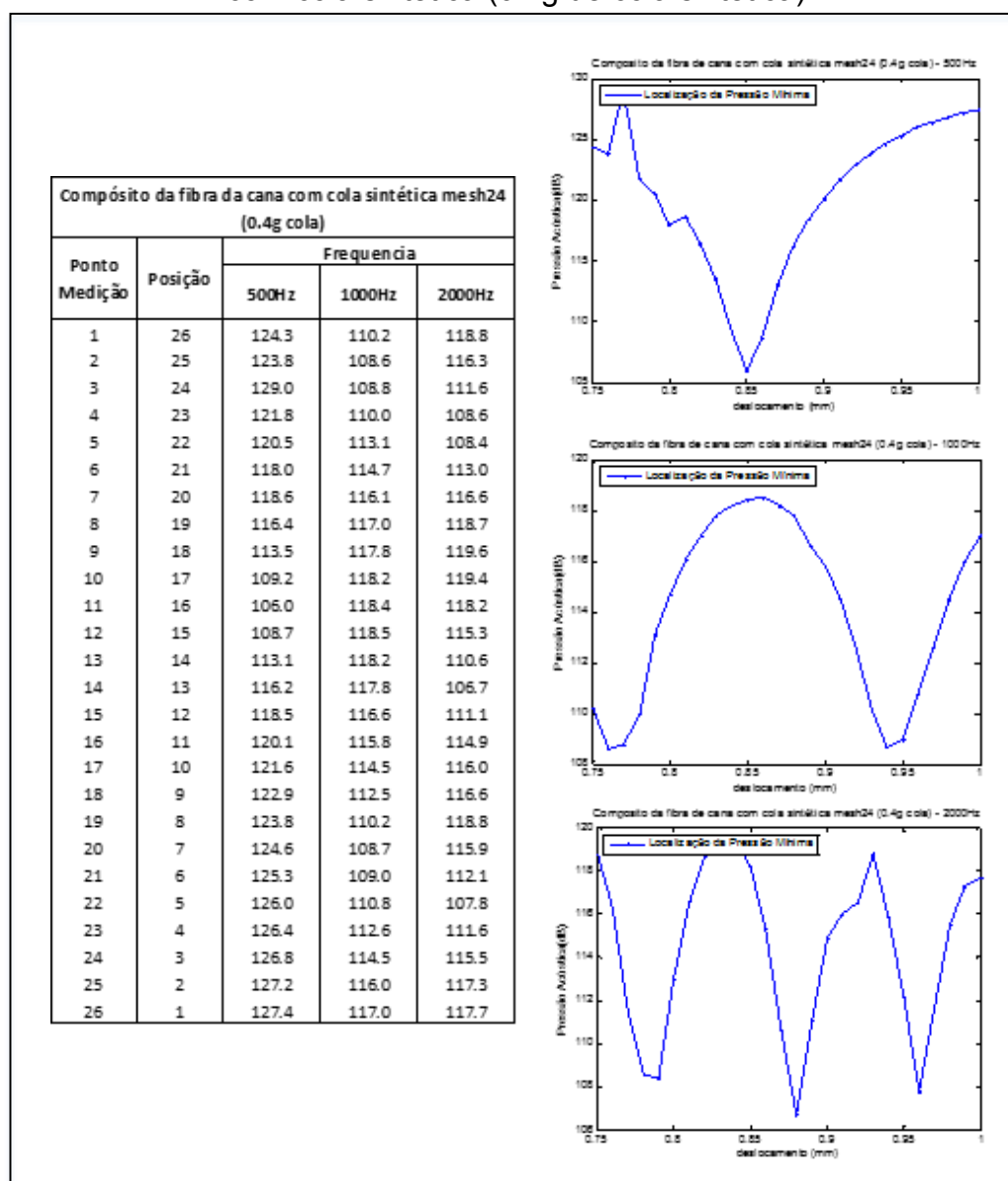
Fonte: Dados da pesquisa do autor

Figura 24 – Valores de pressão sonora do compósito de fibra de cana de *mesh12* e *mesh24* com cola branca



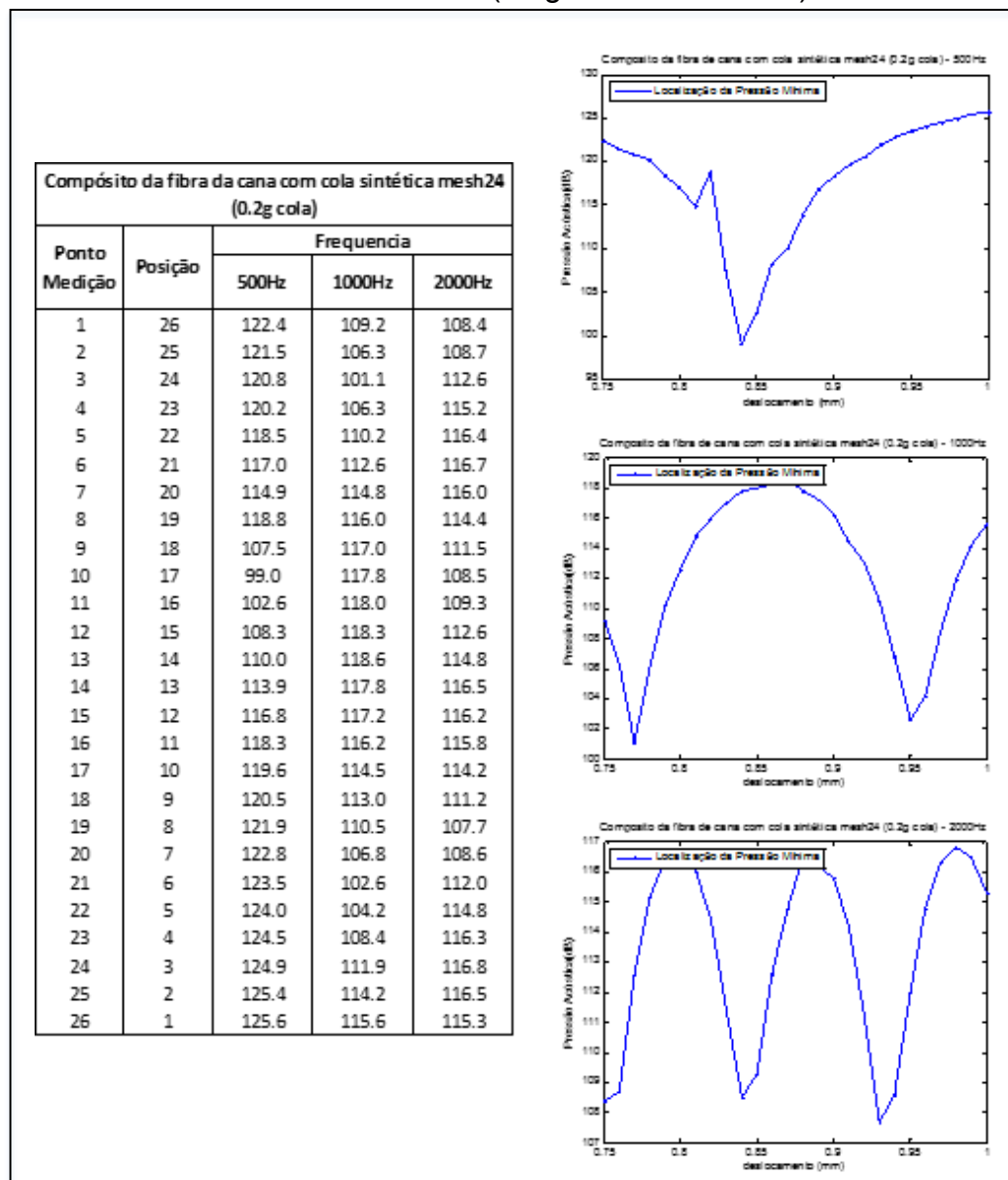
Fonte: Dados da pesquisa do autor

Figura 25 – Valores de pressão sonora do compósito de fibra de cana de *mesh24* com cola sintética (0.4g de cola sintética)



Fonte: Dados da pesquisa do autor

Figura 26 – Valores de pressão sonora do compósito de fibra de cana de *mesh24* com cola sintética (0.2g de cola sintética)



Fonte: Dados da pesquisa do autor

Nas medições foram feitas alterações na intensidade sonora, amplificando a pressão sonora, para que os resultados das pressões sonoras não sofressem interferência do meio externo. O motivo do aumento da intensidade sonora é que se a pressão no interior do tubo for menor que a pressão externa (ambiente), ocorrerá interferências de ruídos não desejáveis, alterando o resultado da pressão sonora. A condição de alteração de intensidade é demonstrado pelos gráficos de cada amostra do compósito, especificamente nos eixos de pressão sonora (dB) com as respectivas frequências 500Hz, 1000Hz e 2000Hz. A tabela 6 mostra os valores dos

coeficientes de absorção acústica calculados, por faixa de frequência, para os vários compósitos.

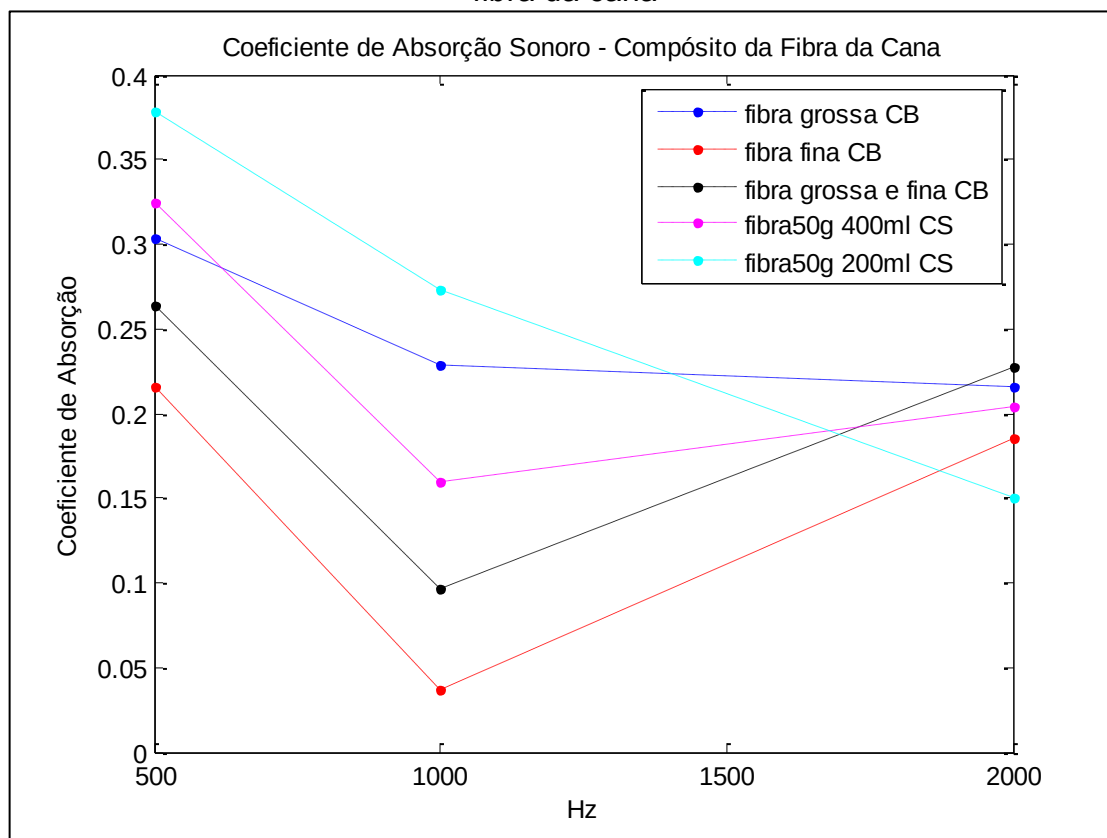
Tabela 6 – Coeficiente de absorção sonora dos compósitos da fibra da cana

descrição frequencia	Coeficiente de Absorção Sonora Calculado				
	cola branca			cola sintética	
	50 g de fibra com 0.5 g de cola			50 g de fibra com 400ml cola	50 g de fibra com 200ml de cola
	mesh24	mesh12	mesh12 e 24	mesh24	mesh24
500Hz	0,30	0,22	0,26	0,32	0,38
1000Hz	0,23	0,04	0,10	0,16	0,27
2000Hz	0,22	0,19	0,23	0,20	0,15

Fonte: Dados da pesquisa do autor

A figura 27 mostra os resultados dos coeficientes de absorção acústica dos compósitos da fibra da cana.

Figura 27 – Valores do coeficiente de absorção sonora dos diferentes compósitos da fibra da cana



Fonte: Dados da pesquisa dos autor

Os dados dos coeficientes de absorção acústica da tabela 6 podem ser interpretados da seguinte orientação, a análise comparativa entre os compósitos e a análise comparativa entre as frequências. A interpretação dos dados pela análise comparativa entre os compósitos demonstra que para a frequência de 500Hz os coeficientes de absorção acústica dos compósitos com cola sintética tem valores superior aos compósitos desenvolvidos com cola branca. Para a frequência de 1000Hz, os coeficientes de absorção acústica dos compósitos com cola sintética, de uma forma geral, tem valor superior aos compósitos com cola branca. Para a frequência de 2000Hz, os valores dos coeficientes de absorção acústica dos compósitos de cola sintética e dos compósitos com cola branca são próximos.

Já a análise comparativa dos coeficientes de absorção acústica entre as frequências, sugere que para a frequência de 500Hz os valores dos coeficientes de absorção acústica, de uma forma geral, são superiores aos coeficientes encontrado para 1000Hz e 2000Hz. Para a frequência de 1000Hz os valores dos coeficientes de absorção sonora são inferiores a encontrados na frequência de 500Hz. Para a frequência de 2000Hz os coeficientes de absorção sonora, de uma forma geral, se posicionam entre os resultados dos coeficientes encontrados na frequência de 500Hz e 1000Hz. A tabela 7 mostra de maneira resumida estas comparações.

Tabela 7 – Comparação entre os coeficientes de absorção acústica dos compósitos de fibra da cana.

Frequencia Tipo de Análise	Análise dos resultados dos coeficientes de absorção sonora		
	500Hz	1000Hz	2000Hz
Análise entre os compósitos	Os compósitos com cola sintética tem valores de coeficiente de absorção superiores aos de cola branca	O compósito com cola sintética, de uma forma geral, tem valor superior aos compósitos com cola branca.	Todos os valores dos coeficientes de absorção sonora dos compósitos com cola sintética e branca, de uma forma geral, são próximos uns dos outros.
Análise entre as frequências	Tem valores de coeficiente de absorção sonora superior aos de 1000Hz e 2000Hz	Tem valores de coeficiente de absorção sonora inferiores aos de 500Hz	Tem valores de absorção sonora entre as frequências de 500Hz e 1000Hz

Fonte: Próprio autor

Os resultados dos coeficientes de absorção acústica encontrados nos compósitos desenvolvidos com cola sintética são mais eficazes devido a uma análise simples da textura dos compósitos, observa-se que o compósito de cola

sintética é mais maleável em relação ao de cola branca que é mais “duro”, provavelmente isso explicaria sua maior absorção.

5.3 Comentários e discussão

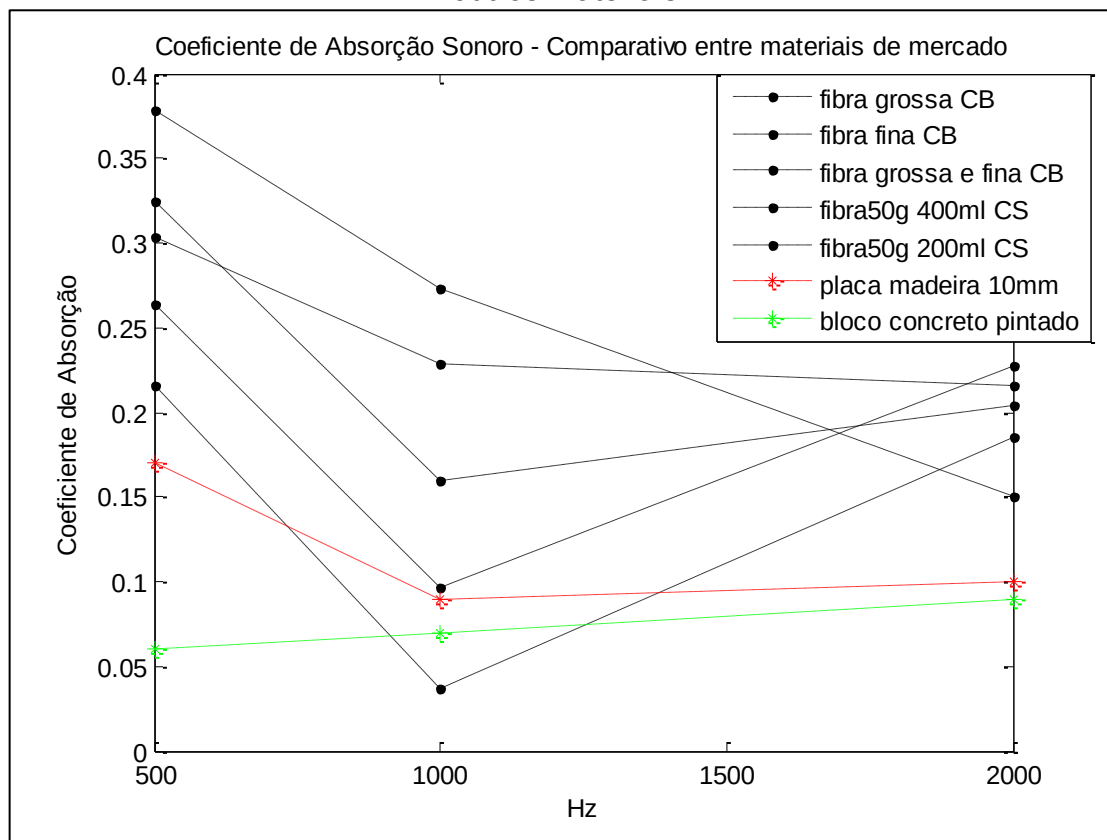
Em relação ao tamanho da fibra, conforme discutido no capítulo três, apenas no compósito de cola branca foi utilizada fibras de *mesh12*, nos compósitos de cola sintética foi utilizado apenas fibra *mesh24*, variando a quantidade de cola sintética.

Analisando a composição de cola sintética nota-se que o compósito com menor quantidade de cola apresenta maiores coeficientes de absorção. Isso provavelmente está relacionado com a quantidade de cola que, de certa forma, altera as características do material fibroso/poroso da fibra da cana para um material mais sólido, mais “espelhado”.

Uma comparação dos valores com materiais comerciais, apresentados na tabela 2 mostra que os valores obtidos, principalmente, para o compósito de cola sintética com menor quantidade de cola apresentam coeficientes de absorção de mesma ordem de grandeza de materiais do tipo expumex (material espumoso) coeficiente 0.38 e um pouco inferior a materiais do tipo isover (material fibroso). Quando comparados com materiais do tipo fibra de vidro os coeficientes obtidos são muito inferiores, entretanto quando comparados com madeira ou concreto, apresentam valores de absorção bem melhores.

Na figura 28, apenas com o intuito de ilustração, é apresentado o gráfico dos coeficientes de absorção dos diferentes compósitos analisados juntamente com uma fibra natural (madeira) e um material poroso (concreto pintado).

Figura 28 – Comparação do coeficiente de absorção acústica da fibra da cana e de outros materiais



Fonte: Dados da pesquisa dos autor

Analisando comparativamente os valores dos coeficientes de absorção sonora dos materiais escolhidos com os valores dos coeficientes de absorção dos compósitos, nota-se que a maioria dos valores do coeficiente de absorção do compósito da fibra da cana está entre os valores da fibra de vidro e da placa de madeira. Possibilitando assim, o entendimento de que os compósitos da fibra da cana poderiam ser utilizados como material de absorção acústica.

5.4 Conclusão

Neste trabalho foram discutidos os conceitos de acústica e da norma ISO10534-1(1996), para obtenção do coeficiente de absorção acústica. Foi ainda discutido o processo de elaboração do compósito da cana de açúcar, com a caracterização do experimento do tubo de impedância, os testes realizados, e o cálculo do coeficiente de absorção sonora dos diferentes compósitos.

Através da análise dos resultados do coeficiente de absorção sonora da fibra da cana e da comparação entre os materiais de mercado, conclui-se que a fibra da cana pode ser utilizada como material de absorção acústica.

Sabendo-se da possibilidade de este material ser um absorvedor acústico, empresas que trabalham diretamente com a fibra da cana, podem criar alternativas de consumo em diferentes mercados e até mesmo reduzir o excesso deste material em estoque. Uma alternativa é melhorar o processo de fabricação do compósito da fibra da cana, utilizando técnicas e conceitos acústicos e físicos na análise do comprimento e espessura da fibra. Outra possibilidade é averiguar o interesse no desenvolvimento do produto com empresas multinacionais que usufruem de materiais absorvedores, considerando as montadoras, empresas fabricantes de trocador de calor, ar condicionado, construção civil e até de instrumentos musicais.

Estudos futuros deste trabalho poderiam ser o desenvolvimento no processo de fabricação do compósito introduzindo diferentes materiais como anti-chamas no compósito, estudo direcionado ao diâmetro e comprimento da fibra da cana, e resistência do material compósito. Outro estudo futuro pode ser a avaliação da capacidade do material na utilização do controle passivo de ruído.

REFERENCIAS

- ANELL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica**. Brasília : ANEEL, 2002. 153 p.
- BALACHANDRAN, B.; MAGRAB, E. B. **Vibrações mecânicas**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 616 p.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. São Paulo: Edgard Blucher, 2011. 380 p.
- CELOTEX, Etc. **Time**, New York, v. 7, n. 17, p. 29, 26 Apr. 1926.
- CHEEKE, J.; DAVID, N. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**. Boca Raton: CRC Press, 2002. 462 p.
- CHUNG, J. Y.; BLASER, D. A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties: I. Theory. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 68, n. 3, p. 914-921, Sep. 1980.
- CROCKER, M. J. **Handbook of noise and vibration control**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 1569 p.
- DELANY, M. E.; BAZLEY, E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. **Applied Acoustics**, Kidlington, v. 3, n. 2, p. 105-116, Apr. 1970.
- ENFLO, B.O.; HEDBERG, C.M. **Theory of nonlinear acoustics in fluids**. New York: Kluwer Academic, 2004. 289 p.
- FAHY, F. J. **Foundations of engineering acoustic**. Amsterdam: Elsevier, 2005. 443 p.
- FARINA, A.; FAUSTI, P. Standing wave tube techniques for measuring the normal incidence absorption coefficient: comparison of different experimental setups. In: INTERNATIONAL FASE SYMPOSIUM, 11., Valencia, 1994. **Proceedings...** Valencia: [s.n.], 1994. Disponível em: <<http://www.aurora-plugins.it/public/papers/056-fast94.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- FORD, R. D.; McCORMICK, M. A. Panel sound absorbers. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 10, p. 411-423, 1969.
- GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controles**. Florianópolis: NR Editora, 2000. 696 p.
- JING, X.; SUN, X. Flat-response sound source technique for using the two-microphone method in na impedance tube (L). **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 122, n. 5, p. 2519-2521, Nov. 2007.
- KING, G.C. **Vibrations and waves**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. 228 p.

KINSLER, L. E. et al. **Fundamentals of acoustics**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1999. 548 p.

KNOBEL, R. **An introduction to the mathematical theory of waves**. Providence: American Mathematical Society, 2000. 196 p.

KOIZUMI, T.; TSUJIUCHI, N.; ADACHI, A. The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. In: BREBBIA, C. A.; WILDE, W. P. de. (Eds.). **High performance structures and composites**. Southampton: WIT Press, 2002. 10 p.

NOR, M.J.M.; AYUB, MD.; ZULKIFLI, R. Effect of compression on the absorption of coir fiber. **American Journal of Applied Sciences**, New York, v. 7, n. 9, p. 1285, 2010.

MALECKI, I. **Physical foundations of technical acoustic**. London: Pergamon Press, 1969. 743 p.

MOREIRA, N. H.; BASSI, A. B. M. S. Sobre a primeira lei da termodinâmica. **Revista Química Nova**, Campinas, v. 24, n. 4, p. 536-567, 2001.

PAIVA, R. P. O. de; MORABITO, R. Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 14, n. 1, p. 25-41, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v14n1/03.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2013.

ROMEL, D.V. et al. Cinza do bagaço da cana de açúcar como agregado em concretos e argamassas. **Revista Eletrônica em Engenharia Civil**, Goiânia, v. 8, n. 1, 2014. Disponível em: <<http://revistas.ufg.br/index.php/reec/article/view/26534/16077>>. Acesso em: 24 abr. 2014.

RUSSEL, D. **Acoustics and vibration animations**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.acs.psu.edu/drussell/demos.html>>. Acesso em: 27 maio 2013.

SABINE, H. J. Notes on acoustic impedance measurement. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 14, n. 2, p. 143, 1942. Disponível em: <<http://asadl.org/>>. Acesso em: 05 jul. 2013.

STREETER, V. L. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1980. 585 p.

SUM, K. S. Some comments on Sabine absorption coefficient (L). **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 117, n. 2, p. 486-489, 2005.

THORBY, D. **Structural dynamics and vibration in practice**. Amsterdam: Elsevier, 2008. 401 p.

UNIVERSITY OF COLORADO. **PHET Intercative Simulations**. Boulder: University of Colorado, 2013. Disponível em: <<http://phet.colorado.edu/en/simulations/category/new>>. Acesso em: 27 maio 2013.

VIEIRA, R.J de A. **Desenvolvimento de painéis confeccionados à partir de fibra de côco para controle acústico de recintos**. 262 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

VORONINA, N. Acoustic properties of fibrous materials. **Applied Acoustic**, Amsterdam, v. 42, n. 2, p. 165-174, 1994.

VORONINA, N. Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material. **Applied Acoustics**, Amsterdam, v. 48, n. 2, p. 121-132, 1996.

ZILL, D. G. **Equações diferenciais com aplicações em modelagem**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 410.p.