

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

CLAUDIA CILENE BITTENCOURT DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE
MATERIAIS ABSORVENTES NATURAIS PARA BAIXA
FREQUÊNCIA COM TRÊS MÉTODOS.**

**CURITIBA
Setembro – 2018**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

CLAUDIA CILENE BITTENCOURT DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE
MATERIAIS ABSORVENTES NATURAIS PARA BAIXA
FREQUÊNCIA COM TRÊS MÉTODOS.**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Key Fonseca de Lima

**CURITIBA
Setembro – 2018**

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Edilene de Oliveira dos Santos CRB - 9/1636

S586a
2018

Silva, Claudia Cilene Bittencourt da
Avaliação do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes naturais para baixa frequência com três métodos / Claudia Cilene Bittencourt da Silva ; orientador, Key Fonseca de Lima. -- 2018
129 f. : il.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2018
Bibliografia: f. 111-117

1. Engenharia mecânica. 2. Engenharia acústica. 3. Ondas sonoras. 4. Controle do ruído. 5. Isolamento acústico. I. Lima, Key Fonseca.
II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD 20. ed. – 620.1

TERMO DE APROVAÇÃO

Claudia Cilene Bittencourt da Silva

Avaliação do Coeficiente de Absorção Sonora de Materiais Absorventes Naturais para Baixa Frequência com Três Métodos

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. João Moraes da Silva Neto
Universidade Federal do Paraná - UFPR



Prof. Dr. Nilson Barbieri
Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR



Prof. Dr. Key Fonseca de Lima
PUCPR, Orientador



Curitiba, 05 de setembro de 2018

Ao meu grande amor, Cristian Emmerick e sua família, que sempre estiveram presentes nos momentos mais importantes.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela proteção, saúde e felicidade.

Aos meus pais, Claudio Bahia e Catarina Bittencourt, que fizeram de mim o que sou e, com isso, contribuíram para eu trilhar o meu próprio caminho, chegando onde estou.

Ao Cristian Emmerick, pelo amor, parceria, incentivo e apoio em todas as minhas decisões.

Ao Mestre Alfredo Emmerick, pelo apoio e contribuições de seus conhecimentos neste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Key de Lima que acreditou em mim desde o início, permitindo-me entrar no mundo da Acústica, dedicando parte do seu precioso tempo para unir conhecimentos, mesmo sabendo que as dificuldades seriam maiores, devido a minha formação de origem. A este Doutor, eu agradeço por tudo que tem feito por mim, desde de seus ensinamentos, repletos de muita dedicação, as ajudas para enxergar o mundo com um olhar matemático cheio de clareza para decifrar as frequências da vida. O meu muito obrigada vai para ele que me levou a um patamar pelo qual jamais pensei que eu fosse capaz de chegar.

Ao Professor Doutor Nilson Barbieri pelas conversas sábias, ensinamentos e principalmente a amizade.

Aos amigos, em especial, Renan Rodrigues que me direcionou ao mestrado, a minha grande amiga Ana Mansur pela amizade, ajuda e paciência.

A secretária do curso Sr^a. Janete por toda paciência, ajuda e amizade.

Aos amigos do laboratório de Dinâmica e Laboratório de Sistemas Térmicos: Mansur, Calado, Borges, Batistella, Terashima, Legat, Terre, De Santana, De Luca, Cirino, Pimentel, Mannala, Castillo, Gros, Mazuroski, pelas conversas descontraídas na hora do café e por todo apoio, pois cada um, de alguma forma, colaborou para enriquecer meus conhecimentos e crescimento como profissional de acústica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Quem procura ter sabedoria ama a vida, e quem age
com inteligência encontra a felicidade”
(Salomão, Provérbios 19:8, 900 AC.)

RESUMO

O ruído acima de determinados níveis, gerado por várias tecnologias, é um dos grandes agentes nocivos à saúde humana, causando danos como perda da audição, mal-estar e, dentro de outros males, o stress. Pesquisas com base em materiais alternativos e sustentáveis vem sendo realizadas em escala mundial, a fim de substituir esses agentes altamente poluentes ao meio ambiente. Atualmente, as fibras de origem natural, vêm sendo pouco aproveitadas, usadas comumente como resíduos da agricultura ou, por vezes, descartadas como lixo. Na construção civil, tanto o conforto acústico quanto a necessidade da utilização de matérias primas sustentáveis têm sido uma grande preocupação entre arquitetos e engenheiros. O benefício do uso de fibras naturais na fabricação de painéis de absorção sonora, por exemplo, permite que ele seja descartado na forma de adubo, atendendo normas ambientais. Nesta dissertação foram avaliadas as propriedades acústicas de três tipos de amostras com fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar em espessuras finas para combinar entre si e alcançar espessuras maiores. Entretanto, no decorrer das análises experimentais, foram provadas as dificuldades de trabalhar com métodos em que a temperatura e o clima são variáveis, pois os controles dessas variantes exigem materiais específicos para aparatos de medição. As propriedades de coeficiente de absorção sonora, a impedância característica e o número de onda complexo foram avaliadas através de métodos experimentais e empíricos. Sendo que o coeficiente de absorção sonora foi determinado pelo método da função de transferência, segundo a norma *America Society for Testing and Materials E 1050-10* (2012), enquanto que a impedância característica com o número de onda complexo foram avaliadas pela resistividade ao fluxo conforme a norma *America Society for Testing and Materials C 522-03* (2009). Os modelos empíricos confirmaram resultados com altas flutuações, oscilando acima do esperado, comprovando a deficiência para frequências baixas. Com isso, as análises obtidas demonstraram que o coeficiente de absorção tem o melhor desempenho para amostras de cana-de-açúcar, sendo o modelo experimental mais confiável para análise deste trabalho.

Palavras-chave: Coeficiente de absorção sonora, Método experimental, Resistividade ao fluxo, Impedância característica, Número complexo de onda.

ABSTRACT

Noise above certain levels, generated by various technologies, is one of the major agents harmful to human health, causing damage to human such as hearing loss, malaise and within other ills, stress. Researches based on alternative and sustainable materials have been carried out worldwide, in order to replace these highly polluting agents to the environment. Fibers from natural sources have low exploitation, and are often used as agricultural residue or, oftentimes, disposed as rubbish. At construction industry, both acoustic welfare and the need for sustainable raw materials are turning a big concern among engineers and architects. The benefits from applying natural fiber to the acoustics absorber panel manufacturing, for instance, allows a disposal as fertilizer complying with environment standards. In this thesis, three types of natural fibers had their acoustics properties evaluated, with greater thicknesses built upon thinners coconuts, sugar cane and sisal samples. However, in the course of experimental analysis, it was verified the major difficulty of working with methods where climate and temperature are unstable, since these changes regulation demands special material for measurements tooling. Sound absorption coefficient, characteristic impedance and complex wave number properties have been evaluate through empirical and experimental methods. Where the sound absorption coefficient was determinate by the transfer function method, following the standard America Society for Testing and Materials E 1050-10 (2012), whereas the characteristic impedance and the complex wave number were evaluated for their airflow resistivity following standard America Society for Testing and Materials C522-03 (2009). The empirical models confirm high fluctuation results, floating above the expectations, probing the liability on low frequencies. Therefore, the analysis achieved evidences that absorption coefficient has a better performance on sugar cane samples, resulting in experimental analysis model as the most trustworthy on this work.

Key words: Sound absorption coefficient, experimental method, airflow resistivity, characteristic impedance, complex wave number.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenho esquemático do corte transversal do coco e suas partes em 01 e imagem real do coco gigante ou coco verde em 02.	14
Figura 2: Embalagem com Fibra de coco e resíduos na parte inferior do pacote provenientes do Mesocarpo.	14
Figura 3: Plantação de Sisal destinado para exportação.	15
Figura 4: Processo manual de desfibramento da folha do sisal.	16
Figura 5: Fibra de sisal no processo de secagem e após o desfibramento.	16
Figura 6: Mapa da distribuição do plantio de cana-de-açúcar no País.	18
Figura 7: Lavagem da cana-de-açúcar para retirada das impurezas em 01 e o resíduo da cana-de-açúcar.	20
Figura 8: Onda longitudinal se propagando em uma corda.....	22
Figura 9: Curva periódica que traduz o som puro.	23
Figura 10: Representação de uma onda sonora que traduz o Ruído, Ruído flutuante.	23
Figura 11: Propagação da onda plana dentro de um tubo.	24
Figura 12: Posição inicial e de deslocamento de um fluido que passa como onda sonora através de um elemento qualquer.	27
Figura 13: Material poroso de Poliuretano expandido, imagem 01 e Fibra natural de sisal, imagem 02.	33
Figura 14: Camadas de fluidos de espessuras finitas em contato com uma superfície plana impermeável.	35
Figura 15: Esquema ilustrativo do aparato de Resistividade ao fluxo, segundo a Norma.....	36
Figura 16: Desenho esquemático da bancada de medição de tortuosidade.....	37
Figura 17: Aparato ou câmara de medição de porosidade de Champoux <i>et al.</i>	39
Figura 18: Sistema de medição de porosidade por Champoux <i>et al.</i>	40
Figura 19: Gráfico assintótico da câmara vazia de porosidade com volume de 157 cm ³ de Champoux <i>et al.</i>	41
Figura 20: Balança digital de precisão centesimal da marca GELAKA BK 4000.	47

Figura 21: Cola adesiva PVA Cascorez, alto desempenho e a cola Tenaz biodegradável, baixo desempenho.	49
Figura 22: Exemplo de Molde de amostra de fibra, tampa em liga metálica (Latão) e cilindro de acrílico.	50
Figura 23: Estufa para acelerar o tempo de cura das amostras.	51
Figura 24: Paquímetro digital.	52
Figura 25: Processo de fabricação da amostra que vai desde a seleção até os processos de modulação.	53
Figura 26: Amostras de fibras de coco, sisal e cana-de-açúcar, espessura de 5mm, feitas em laboratório.	54
Figura 27: Desenho esquemático da bancada de Resistividade ao Fluxo.	57
Figura 28: Bancada de medição de Resistividade ao Fluxo.	57
Figura 29: Esquema ilustrativo das quatro bancadas de resistividade ao fluxo.	59
Figura 30: Medição de espuma de polímero no experimento de porosidade utilizando água.	62
Figura 31: Medição de espuma de polímero no experimento de porosidade utilizando água.	63
Figura 32: Amostras de espuma de polímero e as avaliações de suas porosidades.	64
Figura 33: Câmara de porosidade.	66
Figura 34: Esquema ilustrativo do sistema da câmara de porosidade de volume de 714,412mm ³	66
Figura 35: Esquema ilustrativo da câmara de vácuo com amostra para medição de porosidade.	71
Figura 36: Medição teste na câmara de vácuo com amostra de espuma de polímero para medição de porosidade.	72
Figura 37: Espumas de polímero Rosa 01 e Branca 02 de 71,50mm de diâmetro e 21,00mm de espessura.	74
Figura 38: Desenho esquemático da bancada de tortuosidade.	74
Figura 39: Disposição das tensões V1 e V2 e as respectivas distâncias d1, d2, d3 e d4.	75
Figura 40: Bancada de tortuosidade antes 01 e depois do experimento 02 com espuma de polímero.	75

Figura 41: Esquema ilustrativo do tubo de impedância para o método da função de transferência conforme a norma ASTM 1050-10.....	78
Figura 42: Bancada para experimentos em Tubo de impedância para as propriedades acústicas.....	79
Figura 43: Linhas nodais para distribuição transversal de pressão num duto circular para $m=3$ e $n=2$	80
Figura 44: Analisador e gerador de sinal Brüel & Kjaer, type 3106-A-042.	81
Figura 45: Microfones Brüel & Kjaer type 4935 de ¼” pré-amplificados.	81
Figura 46: Distâncias dos microfones do tubo de impedância.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Levantamento sistemático da produção agrícola, coco.	13
Tabela 2: Tabela de alguns produtos agrícolas que perderam relevância econômica no país em 2018.	17
Tabela 3: Produção agrícola temporária no estado do Paraná, levantamento de 2015.	19
Tabela 4: Produção agrícola no Brasil, levantamento de julho de 2017.....	19
Tabela 5:Tabela de proporção de fibra e cola.	47
Tabela 6: Tempo de cura da cola Cascola usada como aglutinante da fabricação das amostras.....	48
Tabela 7: Molde das amostras feitas em laboratório com respectivos diâmetros para altura interna de 5 mm.....	50
Tabela 8:Tempo de cura ideal para fabricação de amostras dentro do molde e dentro da estufa.....	53
Tabela 9: Total de fibras produzidas.....	55
Tabela 10: Especificação dos componentes da bancada.	58
Tabela 11: Características das espumas usadas inicialmente nas medições.	64
Tabela 12: Resultado da tortuosidade de dez amostras de espuma branca de porosidade 0,558, que foram feitas em água.	76
Tabela 13: Propriedades das amostras.	87
Tabela 14: Combinações das amostras de fibra de coco de espessura de 5 mm. As lacunas vazias representam resultados espúrios.	88
Tabela 15: Combinações das amostras de fibra de sisal de espessura de 5 mm. As lacunas vazias representam resultados espúrios.	88
Tabela 16: Combinações das amostras de fibra de Cana-de-açúcar de espessura de 5 mm. As lacunas vazias representam resultados espúrios.	88
Tabela 17:Perda de carga representada pela variação de pressão nas amostras de cana-de-açúcar, 71 de diâmetro.	89
Tabela 18:Resultado de sete medições de sete amostras de coco intercaladas entre si.....	89
Tabela 19: Resultados das médias da resistividade ao fluxo de todas as amostras.	91

Tabela 20: Limites inferiores das equações de Delany & Bazley (1970)	97
Tabela 21: Combinações das amostras com o objetivo de alcançar as espessuras 15 mm, 20 mm e 30 mm.	98
Tabela 22: Resultado das Médias das combinações das amostras de fibras naturais de espessura de 5 mm.....	98
Tabela 23: Medição em amostras de coco de diâmetros 62,0, 71,5 e 80 mm, respectivamente.	118
Tabela 24: Medição em amostras de coco de diâmetro 89,5 mm.....	119
Tabela 25: Medição em amostras de sisal de diâmetros 62,0, 71,5 e 80 mm, respectivamente.	120
Tabela 26: Medição em amostras de sisal de diâmetro 89,5 mm.	121
Tabela 27: Medição em amostras de cana-de-açúcar de diâmetros 62,0, 71,5 e 80,0 mm, respectivamente.	122
Tabela 28: Medição em amostras de cana-de-açúcar de diâmetro 89,5 mm.....	123
Tabela 29: Variação de pressão nas amostras de coco, diâmetros 62,0, 71,5 e 80,0 mm.	124
Tabela 30: Variação de pressão nas amostras de coco, diâmetro 89,5 mm.	125
Tabela 31: Variação de pressão nas amostras de sisal, diâmetros 62,0, 71,5 e 80,0 mm.	126
Tabela 32: Variação de pressão nas amostras de sisal, diâmetro 89,5 mm.....	127
Tabela 33: Variação de pressão nas amostras de cana-de-açúcar, diâmetros 62,0, 71,5 e 80,0 mm.	128
Tabela 34: Variação de pressão nas amostras de cana-de-açúcar, diâmetro 89,5 mm.	129

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Resultado das Medições de 10 espumas de polímero brancas utilizando água, variando entre 46% à 61%.	65
Gráfico 2: Resultado da medição das espumas Branca e Rosa na bancada de tortuosidade.	77
Gráfico 3: Resultado da resistividade ao fluxo das amostras de fibras de coco.....	90
Gráfico 4: Resultado da resistividade ao fluxo das amostras de fibras de sisal.	90
Gráfico 5: Resultado da resistividade ao fluxo das amostras de fibras de Cana-de-açúcar.	91
Gráfico 6: Comparação entre a parte real (Z_c) normalizado entre os dois métodos empíricos.	94
Gráfico 7: Comparação entre a parte imaginária (Z_c) normalizado entre os dois métodos empíricos.	94
Gráfico 8: Comparação entre a parte real (K_c) normalizado entre os dois métodos empíricos.	95
Gráfico 9: Comparação entre a parte imaginária (K_c) normalizado entre os dois métodos empíricos.	95
Gráfico 10: Comparação entre a parte real (Z_s) normalizado entre os dois métodos empíricos.	96
Gráfico 11: Comparação entre a parte imaginária (Z_s) normalizado entre os dois métodos empíricos.	96
Gráfico 12: Comparativos das medições das amostras fibra de coco no método experimental.	100
Gráfico 13: Comparativos das medições das amostras de fibra de sisal no método experimental.	101
Gráfico 14: Comparativos das medições das amostras de fibra de cana-de-açúcar no método experimental.	102
Gráfico 15: Comparativo das medições de todas as amostras de fibras naturais no método experimental.	103
Gráfico 16: Coerência de todas as medições apresentam as mesmas características.	104
Gráfico 17: Comparativo do Coeficiente de absorção sonora (α) do coco: DB x AC x Experimental.	105
Gráfico 18: Comparativo do Coeficiente de absorção sonora (α) para o sisal: DB x AC x Experimental	106

Gráfico 19: Comparativo do Coeficiente de absorção sonora (α) para a cana-de-açúcar: DB x AC x Experimental.	107
--	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

a : aceleração;

A : amplitude sonora;

B : amplitude da onda propagando no sentido negativo;

c : velocidade do som no meio fluido;

C : propriedade de condensação relativa das ondas;

C_1 : amplitude da onda propagando em direção negativa;

C_2 : amplitude da onda propagando em direção positiva;

d : diâmetro do duto;

dx : camada de espessura de um fluido

x : vetor velocidade da partícula;

f : frequência;

F : fator de formação

f_c : frequência de corte;

Fl : força líquida;

$f_{\min}$: frequência mínima;

$f_{\max}$: frequência máxima;

G_{11} : densidade de auto espectral ou o espectro de potência do microfone 1;

G_{12} : densidade espectral cruzada ou o espectro cruzado de potência do microfone 2 em relação ao microfone 1;

H_{12} : função de transferência;

i : unidade imaginária;

j : unidade imaginária;

I : intensidade sonora no ar;

I_0 : intensidade sonora inicial no ar;

K : número de onda em propagação;

$\tilde{K}$: número de onda complexo do material absorvente;

K_{ar} : número de onda em propagação no ar;

K_c : número de onda complexo;

K_s : fator da forma estrutural;

k_x : número de onda na direção x ;

k_y : número de onda na direção y ;

k_z : número de onda na direção z ;

l : espessura do material;

m : massa;

N_{pr} : número de Prandtl;

P : pressão sonora dinâmica no meio;

p : pressão sonora;

p_1 : pressão medida no microfone 1;

p_2 : pressão medida no microfone 2;

$p_{máx}$: pressão máxima no eixo das ordenadas;

p_{min} : pressão mínima no eixo das abscissas;

p_0 : pressão sonora no ar;

$R(f)$: coeficiente de reflexão;

r : resistência acústica específica;

R_0 : resistência ao fluxo de ar;

σ : resistividade ao fluxo de ar;

α : coeficiente de reflexão sonoro;

s : distância entre os microfones 1 e 2;

T : período;

t : tempo;

u : componente do vetor velocidade da partícula na direção x;

v : componente do vetor velocidade da partícula na direção y;

$v(r)$: velocidade de um fluido invíscido dentro do poro;

$v(\omega)$: velocidade de um fluido invíscido na superfície da parede dos poros;

V : volume final do elemento após a passagem da onda sonora;

V_0 : volume inicial do elemento;

V_{ar} : volume de ar;

V_{total} : volume total do material absorvente;

W : potência da onda sonora da fonte;

W_0 : potência sonora de referência;

W_a : energia acústica absorvida;

W_i : energia acústica incidente;

w : componente do vetor velocidade da partícula na direção z;

x : posição na direção do eixo x;

x : reatância específica;

Z_c : impedância característica do ar;

$\tilde{Z}$: impedância específica da onda plana;
 Z : impedância característica do meio;
 Z_s : impedância superficial;
 z : impedância em ondas divergentes;
 Λ : comprimento viscoso;
 η : viscosidade no ar;
 θ : direção θ de propagação em coordenadas cilíndricas;
 ξ : componente do deslocamento da partícula instantânea na direção x ;
 ρ : densidade do meio;
 α_∞ : tortuosidade;
 Ω : porosidade;
 ω : frequência angular;
 γ : calor específico
 Y : coeficiente de propagação;
 λ : comprimento de onda;
 C : condensação;
 V : energia cinemática de velocidade molecular de ondas microscópica;
 $\bar{V}$: energia cinemática de velocidade molecular de ondas macroscópicas;
 σ_a : resistividade na amostra;
 σ_l : resistividade no líquido.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTO	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos.....	2
1.3	JUSTIFICATIVA	2
1.4	CONTEÚDO DESTA DISSERTAÇÃO	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	RESISTIVIDADE AO FLUXO	4
2.2	POROSIDADE.....	5
2.3	TORTUOSIDADE	7
2.4	IMPEDÂNCIA ACÚSTICA	8
2.5	ESTUDO DE MATERIAIS FIBROSOS E POROSOS.	10
3.	FIBRAS NATURAIS	12
3.1	FIBRAS DE ESTUDO: COCO, SISAL E CANA-DE-AÇÚCAR.....	12
3.2	FIBRA DE COCO.....	12
3.2.1	A extração da fibra do coco.....	13
3.3	FIBRA DE SISAL	15
3.3.1	A extração da fibra do sisal	15
3.4	FIBRA DE CANA-DE-AÇÚCAR	17
3.4.1	A extração da fibra da cana-de-açúcar	19
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
4.1	CONCEITOS BÁSICOS	21
4.1.1	Som e Ruído	21
4.2	NATUREZA DO SOM.....	22
4.2.1	Frequência	22
4.2.2	Forma da onda	23
4.2.3	Onda plana.....	24
4.2.4	Pressão sonora	24
4.2.6	Nível de potência sonora	25
4.2.7	Nível de pressão sonora.....	25
4.2.8	Nível de intensidade sonora.....	26
4.2.9	Equação da onda unidimensional.....	26

4.2.10	Coeficiente de absorção sonora (α).....	33
4.2.11	Resistividade ao fluxo (σ)	35
4.2.12	Tortuosidade α_{∞}	37
4.2.13	Porosidade Ω	38
4.2.14	Impedância	41
4.2.15	Coeficiente de absorção em materiais fibrosos de paredes rígidas	42
5.	TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS	46
5.1	AMOSTRAS DE FIBRAS NATURAIS	46
5.1.1	Balança digital	47
5.1.2	Cola	48
5.1.3	Moldes	49
5.1.4	Estufa à 45°C.....	51
5.1.5	Paquímetro.....	51
5.2	Procedimento e manipulação das amostras	52
6.	TÉCNICAS DE MEDIÇÃO	56
6.1	EXPERIMENTOS.....	56
6.2	RESISTIVIDADE AO FLUXO (σ)	56
6.3	POROSIDADE (Ω)	61
6.3.1	Beraneck – 1942.....	61
6.3.2	Allard e Champoux – 1991.....	65
6.3.3	Gros e Panneton - 2004	70
6.4	TORTUOSIDADE α_{∞}	73
6.5	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA H_{12}	78
7.	ANÁLISES E RESULTADOS	86
7.1	AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE DE FLUXO - ASTM C 522-03 (2009).	87
7.2	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EMPÍRICOS.....	92
7.2.1	Método empírico de Delany e Bazley (1970).	92
7.2.2	Método Empírico de Allard&Champoux (1991)	93
7.3	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL COM O MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.	97
7.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	99
8.	CONCLUSÃO.....	108
	REFERÊNCIAS	111
	WEB REFERÊNCIA	116
	APÊNDICE A – RESISTIVIDADE AO FLUXO - AMOSTRA FIBRA DE COCO.....	118

APÊNDICE B – RESISTIVIDADE AO FLUXO - AMOSTRA FIBRA DE SISAL.....	120
APÊNDICE C – RES. AO FLUXO – AMOSTRA FIBRA DE CANA-DE- AÇÚCAR	122
APÊNDICE D – VARIAÇÃO DE PRESSÃO ΔP (0,1 – 250,0 [Pa]), AMOSTRAS DE COCO.....	124
APÊNDICE E – VARIAÇÃO DE PRESSÃO ΔP (0,1 – 250,0 [Pa]), AMOSTRAS DE SISAL.....	126
APÊNDICE F – VARIAÇÃO DE PRESSÃO ΔP (0,1 – 250,0 [Pa]), AMOSTRAS CANA-DE-AÇÚCAR.....	128

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

As exigências cotidianas impulsionam o homem do Sec. XXI a se adequar às novas transformações, em que muitos dos hábitos considerados obsoletos passaram a ser substituídos por costumes que refletem diretamente na vida diária de uma população. Essas transformações contribuíram para que o indivíduo se tornasse um consumidor nato, e como contrapartida do consumo, existe o descarte dos bens de consumo ultrapassados. Hoje, um dos maiores problemas encontrados no meio ambiente são os descartes exagerados dos materiais com tempo de vida indeterminado, como por exemplo as espumas sintéticas ou a lã de vidro. Atualmente, pesquisas a fim de substituir esses materiais ditos “não degradáveis” por materiais alternativos de origem natural, vem ganhando espaço em escala mundial visando um produto ecologicamente sustentáveis.

Por exemplo, no controle de ruído, as espumas sintéticas se destacam pela alta eficiência na absorção acústica. Entretanto, quando descartada na natureza, o seu tempo de decomposição é muito extenso ou indeterminado, e quando incinerada, gera gases altamente tóxicos. Uma das alternativas para o reaproveitamento desse material sintético é o uso na construção civil para estruturar o concreto. A substituição desse material por painéis de fibras naturais pode ser uma alternativa para absorção acústica mais ecológica. Painéis feitos a partir de fibras naturais, além da sua boa característica acústica e de respeitar o meio ambiente ao ser descartado na natureza, tem um tempo curto de degradação e é abundantemente encontrada em países tropicais, tal como o Brasil. As fibras naturais são porosas e fibrosas, o que contribui para uma boa absorção sonora. Por isso, seu uso vem se tornando objeto de estudo em muitas pesquisas na área de controle de ruído (GERES, 2000). Atualmente tem se focando soluções para as questões ambientais e o uso de fibras naturais vem sendo comprovada como eficiente também nas questões de absorção acústicas.

As fibras da casca do coco, da folha do sisal e o bagaço da cana de açúcar, objetos de estudo desta dissertação, são muito utilizadas como adubo, feno, em artesanato, como

combustível, na fabricação de cordas navais e de vasos ornamentais (LIMA, 2016). Análises da eficiência das fibras naturais através de caracterização acústica e não acústica aplicadas ao controle do ruído podem corroborar para equacionar o coeficiente de absorção, permitindo a substituição de materiais sintéticos por placas de fibras naturais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o Coeficiente de absorção sonora para baixas frequências de amostras de três tipos fibras naturais com três métodos de avaliação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar o uso de materiais fibrosos naturais como potenciais materiais acústicos;
- b) Avaliar o coeficiente de absorção sonora com os métodos empíricos de Delany & Bazley (1970) e Allard & Champoux (1991);
- c) Avaliar experimentalmente o coeficiente de absorção sonora das amostras fabricadas;
- d) Comparar os resultados obtidos provenientes das três análises.

1.3 JUSTIFICATIVA

Ampliar a temática ambiental para novas tecnologias e sensibilizar setores industriais a aderir tecnologias sustentáveis, direcionado a acústica para reduzir os impactos ambientais. Uma alternativa ecológica é a utilização de origem natural como as fibras de coco, sisal e cana-de-açúcar.

O acesso a esses insumos se torna mais fácil por essas fibras serem facilmente encontrada em território nacional e por serem encontradas abundantemente como resíduos de agricultura. Isso as torna menos dispendiosas, podendo gerar um produto ecologicamente viável e acessível à indústria.

1.4 CONTEÚDO DESTA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é dividida em sete capítulos, apresentados da seguinte maneira:

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, em que se descreve um breve relato dos trabalhos estudados, encontrados nas literaturas relacionadas a temas de métodos analíticos, equacionais empíricas e métodos experimentais de fibras naturais como material de absorção;

Capítulo 3: Fundamentação Teórica, descreve alguns conceitos importantes sobre a acústica, destacando as principais grandezas da acústica, equações e propriedade de materiais absorventes;

Capítulo 4: Fibras Naturais, apresenta uma análise das propriedades, características e produção das fibras que foram estudadas, através de dados estatísticos, destacando a maior produção por estado, exportação e colheita;

Capítulo 5: Técnica de Fabricação, em que descreve como as amostras de fibras naturais foram produzidas;

Capítulo 6: Técnica de Medição, apresenta métodos experimentais utilizados na determinação das propriedades acústicas dos materiais absorventes;

Capítulo 7: Análises e Resultados, apresenta as propriedades acústicas dos materiais absorventes das amostras estudadas;

Capítulo 8: Conclusão, apresenta as discursões da dissertação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foi efetuado um estudo amplo das publicações em caracterização acústica para dar suporte à redação e execução desta dissertação.

2.1 RESISTIVIDADE AO FLUXO

Brown & Bolt (1942) publicaram, em seu estudo, medições de resistividade ao fluxo em vinte e quatro amostras, nas quais os dois principais aspectos de medição foram permitir uma correlação entre a impedância acústica e a teoria de medição da absorção sonora. Foi demonstrado um método preciso e detalhado que permitiu, através de uma rotina de medição, o desenvolvimento de novas ou modificadas estruturas de materiais absorventes.

Bies & Hansen (1980) utilizaram sete tipos de materiais fibrosos e porosos na avaliação experimental da resistividade ao fluxo para identificar o controle da reverberação em campo sonoro de um invólucro, a redução da perda de transmissão através de um envoltório de tubos e paredes, e a atenuação ou controle de propagação sonora através de dutos. Com essas aplicações, puderam identificar a eficiência do material poroso e fibroso para o controle sonoro.

Mais recentemente, Sebaa & Fellah (2005) avaliaram numericamente e experimentalmente a resistividade de fluxo de materiais porosos, homogêneos e isotópicos rígidos, utilizando-se do método direto e inverso de Bies & Hansen (1980), para baixa frequência. Neste trabalho, os autores perceberam que as reflexões nas ondas sonoras são proporcionais a resistividade de fluxo das amostras e insignificante quando comparadas a sua porosidade.

Fellah *et al.*, (2006) usaram o método de transmissão acústica a partir de medições de permeabilidade em materiais porosos de paredes rígidas, sendo este parâmetro importante para caracterizar espumas plásticas, materiais fibrosos e granulares. O método tem um modelo de

problema de espalhamento direto e inverso, sendo usado em placa porosa, isotrópica, homogênea e de estrutura rígida para a difusão de ondas transitórias de baixa frequência.

Komatsu (2008) propôs um novo modelo matemático a partir das equações empíricas clássicas de Delany & Bazley (1970) e Miki (1990). O autor introduziu o uso de logaritmo, melhorando os modelos convencionais. Em seu trabalho, foram utilizadas amostras de lã de rocha e de vidro em medições de resistividade ao fluxo e seus resultados foram comparados com o modelo convencional. O autor demonstrou que seu modelo é mais eficiente que o modelo convencional em materiais fibrosos de alta densidade.

Ramis, *et al.*, (2014) propuseram uma metodologia para obter equações empíricas, descrevendo as características de absorção sonora de materiais absorventes em fibras de coco. O método requer medições em resistividade ao fluxo e impedância acústica. As equações são derivadas da impedância acústica e a constante de propagação. Os resultados podem ser úteis em modelos de simulações de sistema acústico para controle de ruído com fibra de coco.

2.2 POROSIDADE

Beranek (1942) utilizou a técnica de mediação da porosidade em materiais absorventes, comparando com medições da resistividade ao fluxo. Neste trabalho, foi proposto um método para avaliação da porosidade medindo a mudança de pressão isotérmica em um volume fechado em amostras de fibra de vidro e espuma sintética. O autor utilizou-se das equações das transformações isotérmicas de gases ideais, com uma teoria simples para prever a impedância acústica normal de materiais isotrópicos em três constantes: resistividade ao fluxo, porosidade e efeito dinâmico de massa de gás incluso.

Champoux *et al.*, (1991) mediram a porosidade de um material absorvente através de uma técnica similar apresentada por Beranek (1942). Neste sistema, utilizaram um aparato para estabilização da variação da pressão. No método de Champoux *et al.*, foi feito um recipiente fechado com um pistão que, quando movimentado, o volume e a pressão interna mudam e a mudança de pressão provocada é medida com transdutor de pressão. O modelo matemático confirma que o aparato pode ser usado para medição de porosidade.

Voronina (1996-a) avaliou três tipos de materiais fibrosos e porosos de paredes rígidas através de experimentos e comparou com equações empíricas, utilizando a impedância

característica e a propagação constante. O autor encontrou uma equação empírica das características estruturais das amostras em função da frequência, porosidade e diâmetro do poro. Os dois modelos foram comparados e mostraram resultados semelhantes para as características estruturais de materiais de fibrosos e porosos de paredes rígidas.

Voronina (1998-b) obteve dados experimentais de um material com baixa porosidade, por ser cerâmica porosa, através do melhoramento das formulações empíricas da impedância característica e propagação constante de Voronina (1996-a). O novo modelo foi comparado com as teorias de Attenborough (2004), usando os dados experimentais obtidos por Champoux *et al.* (1991) das amostras de liga de cerâmica, gerando bons resultados.

Leclaire *et al.*, (2003) fizeram a medição de porosidade com duas câmaras, sendo uma ocupada por amostra e a outra somente com ar, chamada de câmara de referência. O método foi inspirado em Beranek (1942) com base na lei dos gases ideais. O experimento levou em consideração a redução da influência da temperatura no sistema, pois a mesma variação de temperatura é percebida nas duas câmaras.

Gros e Panneton (2004) utilizaram o princípio de Arquimedes na avaliação da porosidade, com uso de vácuo para medir massa porosa aparente de ar, a massa verdadeira em vácuo e o volume de massa sólida. O método é simples e não demanda muito tempo e nem assume condições isotérmicas para o experimento.

Glé *et al.*, (2010) avaliaram as propriedades acústicas de amostras de concreto misturados com fibra de *Cannabis Sativa*, comprovando alta porosidade. Os autores utilizaram os parâmetros de porosidade de Beranek (1942) e resistividade ao fluxo da norma ISO 9053 para caracterizar o corpo amostral. As análises demonstraram que a absorção sonora do material pode ser controlada por meio de componentes adequados ao processo, além disso, bons resultados foram apresentados por ambos os modelos.

2.3 TORTUOSIDADE

Johnson *et al.*, (1987) saturaram uma amostra porosa de parede rígida com um fluido newtoniano (gás Hélio), sujeitando-o a várias oscilações de pressão. Os autores apresentaram um novo parâmetro chamado de comprimento característico na avaliação da tortuosidade de materiais porosos rígidos e não rígidos. Mais tarde, Champoux & Allard (1991) aplicaram o conceito do comprimento característico introduzido na dinâmica da tortuosidade de Johnson *et al.* (1987) para avaliar o módulo de *bulk* ou módulo volumétrico de materiais porosos.

Allard *et al.*, (1993) realizaram medições experimentais em amostras de espuma sintética com base na tortuosidade obtida através da condutibilidade elétrica em meio fluido através de uma amostra de material absorvente. O método se mostrou efetivo para amostras de alta resistividade ao fluxo e tortuosidade; entretanto, as amostras apresentaram desgastes aparentes após os ensaios.

Lauriks *et al.*, (1994) fizeram medições experimentais da tortuosidade, usando amostras no método que usa um transdutor capacitivo e transmissão ultrassônica através da amostra. Os resultados das amostras foram comparados com experimentos de condutividade elétrica e demonstraram boa concordância dos resultados, porém sem desgaste aparente das amostras.

Attenborough, *et al.*, (2004) caracterizaram amostras grossas de poros rígidos através da porosidade e da tortuosidade. O método utilizado pelos autores usa um pulso de banda com frequência central perto de 12 kHz. A tortuosidade é deduzida através da obtenção da velocidade de propagação de fase entre os sinais incidente e refletido, sendo a porosidade obtida diretamente do coeficiente de reflexão sonora. O método apresenta bons resultados até nos casos em que há espalhamento do pulso em frequências mais altas que o limite superior da largura de banda do pulso.

Kino & Ueno (2007) mediram a impedância de superfície e resistividade ao fluxo em amostras de lã de vidro e poliéster para comparar seus coeficientes de absorção previstos pelas equações de Johnson (1987) e Allard *et al.* (1993), com o uso de deduções dos parâmetros físicos para demonstrar discrepâncias que excedem 20% para algumas amostras e em determinadas frequências. Com isso, foram propostas modificações nas equações de Johnson (1987) e Allard *et al.*, (1991) considerando o efeito de densidade efetiva com a introdução de

um fator de correção (resistividade ao fluxo), e, com isso, encontraram melhoramento nas predições.

2.4 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA.

Delany & Bazley (1970) obtiveram as propriedades acústicas de diversas amostras de fibras minerais porosas, fibrosas, isotrópicas e anisotrópicas com diferentes espessuras. Os autores determinaram o coeficiente de absorção como uma função da frequência de excitação através do uso da resistividade ao fluxo dos materiais. Nesse trabalho, foram publicadas duas expressões, uma para a impedância característica complexa e outra para número de onda propagação, expressões que, até o dia de hoje, são muito utilizadas.

Chung & Blaser (1980-a) desenvolveram o método de função de transferência para ser usado em medição de incidência normal de dutos para obtenção das propriedades acústicas de materiais absorventes. Nela, a decomposição da onda determina o coeficiente de reflexão complexo para ter a impedância acústica complexa, coeficiente de absorção de um material e a perda de transmissão sonora em dutos de materiais poroso.

Chung & Blaser (1980-b) validaram a teoria do método da função de transferência através de medições experimentais em espuma de polímero no interior de duto para obter o coeficiente de reflexão complexa e impedância acústica. O coeficiente de absorção foi validado com o método teórico/experimental confrontado com o método de ondas estacionárias proposto por Fahy (1984). O método da função de transferência se mostrou mais rápido e preciso.

Miki (1990) modificou, em seu trabalho, as equações originais de Delany & Bazley (1970) para o estudo de materiais porosos de camadas duplas. Neste trabalho, foram alterados os coeficientes das equações da impedância característica complexa e do número de onda.

Mafra *et al.*, (2005) realizaram uma análise comparativa dos coeficientes de absorção de painéis fabricados a partir de fibra de coco e painel de uso comercial. Os autores analisaram painéis de fibra de coco com espessuras acima de 40 mm, obtendo bons resultados de coeficiente de absorção, em câmara reverberante. Também, foram feitas medições em tubo de impedância para obter resultados de impedância normal e de superfície pelo método da função de transferência para comparar os resultados dos materiais. Os autores comprovaram a eficácia do material feito de fibra de coco, considerado bom para o uso de atenuador sonoro.

Fellah *et al.*, (2006) propuseram uma medição de resistividade ao fluxo de espuma porosa de plástico industrial de parede rígida com base na relação entre a diferença de pressão e a velocidade de ar que atravessam uma amostra. A resistividade ao fluxo foi determinada a partir de problemas inversos e o método tem base em um modelo temporal de espalhamento direto e inverso para a difusão de ondas transientes de baixa frequência. Esse método apresenta vantagem de ser simples e efetivo.

Doutres & Panneton (2010) aplicaram o método indireto com base nos ensaios de tubo de impedância com três microfones para determinar as propriedades acústicas (como o coeficiente de absorção, perda de transmissão sonora, densidade efetiva e módulos de bulk) e as propriedades não acústicas (como a resistividade ao fluxo, tortuosidade e comprimento característico térmico e o viscoso). O método foi aplicado em quatro diferentes materiais e os resultados da caracterização foram comparados com métodos diretos e indiretos existentes. Com isso, confirmaram que medições em tubo de impedância são aptas para encontrar o comportamento acústico em fluido equivalente e as propriedades não acústicas.

Kirby (2014) fez uma revisão completa dos modelos empíricos publicados Miki (1990), Komatsu (2008), Allard & Champoux (1991) e Delany e Bazley (1970), propondo uma nova correção para baixas frequências, em que todos estes modelos puderam levar a propriedades físicas inconsistentes.

Lima *et al.*, (2016) apresentou uma formulação inversa para determinação da impedância característica complexa e do número de onda complexo, com base na avaliação da perda de transmissão sonora da amostra de material absorvente, acoplada a uma câmara de expansão com duto interno perfurado. Na metodologia apresentada, foram estudados vários modelos da literatura e a concordância dos resultados foi considerada muito boa.

Bansod & Mohanty (2016) aplicaram uma caracterização de inversão através do método de otimização do enxame de partículas, ou, do inglês, *Particle Swarm Optimization* (PSO), estimando os parâmetros não acústicos da fibra de juta em forma de feltro e minimizando os erros entre dados experimentais e teóricos da absorção sonora. Os autores utilizaram-se do coeficiente de absorção através da matriz de transferência, juntamente com o PSO.

2.5 ESTUDO DE MATERIAIS FIBROSOS E POROSOS.

Allard & Champoux (1992) elaboraram uma nova expressão numérica a partir da equação de Delany e Bazley (1970), com a qual validaram a equação para baixas frequências e a usaram em frequência dependente de forças viscosas em materiais porosos para prever o módulo de *Bulk*. Os autores sugeriram que a propagação sonora em materiais fibrosos é dependente do diâmetro da fibra e da densidade do material.

Kirby & Cummings (1999) fizeram um trabalho com base em um método semi empírico em meio fibroso, nos quais descreveram um modelo capaz de prever as propriedades de *bulk* da lã de basalto em baixa e alta frequências. As propriedades dos materiais foram obtidas através de experimentos e os dados expressos na forma de lei de potência em conjunto ao método de ajuste de curva de Delany & Bazley (1970).

Ersoy & Küçük (2009) fizeram o reaproveitamento das fibras de folha de chá e uma fina camada de tecido para testes com a finalidade de determinar as propriedades de absorção acústica, utilizando dois tipos de amostras, uma com proteção de camada rígida com tecido. A absorção sonora foi avaliada na faixa de frequência entre 500Hz e 3200Hz. O experimento foi feito em tubo de impedância com dois microfones e função de transferência para caracterização do material.

Fouladi *et al.*, (2009) usaram fibras de coco com látex e outros aditivos para potencializar as características estruturais da fibra de coco, usando como placas perfuradas com estrutura de multicamadas. Os modelos matemáticos analisados para esse experimento foram de Allard (1991), Beranek (1942) e Atalla (2009) e o método da função de transferência por Allard (1993) e realizados em tubo de impedância. O experimento realizado com placas perfuradas de coco contribuiu para redução da espessura da placa como isolamento acústico.

Fouladi *et al.*, (2010) destacaram, em seu experimento, o uso sustentável de fibra de coco em estudo para aquisição do coeficiente de absorção acústica de dois tipos materiais fibrosos, a casca do coco fresca e úmida e a mistura industrial com atadura através dos modelos de Delany & Bazley (1970), Biot (1956) e Champoux *et al.*, (1991). O modelo experimental com o tubo de impedância foi utilizado para aquisição de resultados com amostras de 20 e 45 mm. Os resultados mostraram que esses tipos de amostras não têm bons resultados para avaliar sons de baixa frequência.

Liu, S. *et al.*, (2014) propuseram uma metodologia para produzir material fibroso poroso destinado a absorção sonora para faixas de frequência pré-definidas, na qual o material assume uma estrutura rígida e hexagonal de fibras arrançadas. Para isso, é usado o modelo analítico de Johnson (1987) e Champoux & Allard (1991) para investigar as influências dos parâmetros de microestrutura no coeficiente de absorção sonora. Além disso, foram avaliados parâmetros macroacústicos para determinar a microestrutura hexagonal, com as análises de elementos finitos.

Pilon *et al.*, (2004) pesquisaram os efeitos da circunferência dos poros de uma espuma elástica, com o objetivo de identificar as propriedades físicas dos materiais para avaliar o Coeficiente de absorção sonora. Esse método utilizou-se do tubo de ondas estacionárias.

Bil'ová & Lummitzer (2011) avaliaram importantes parâmetros acústicos de materiais porosos como a resistividade ao fluxo, a porosidade e a tortuosidade. Os autores destacaram a importância do aprofundamento no conhecimento a respeito do material poroso designado ao controle do ruído e ressaltaram que as características físicas do material poroso são o principal fator de progresso para as tecnologias da absorção sonora dos materiais.

Arenas & Crocker (2010) fizeram um estudo amplo dos tipos de matérias porosos e fibrosos usados ao longo dos anos, com o objetivo de avaliar a qualidade desses materiais em relação a sua absorção sonora. O estudo levantou dados de materiais para absorção sonora como o amianto e as fibras naturais. O trabalho confirmou que as fibras naturais são sustentáveis e viáveis ao meio ambiente, pois não emitem gases poluentes ao ser incineradas e indicou possibilidade do uso de tecnologia para redução do ruído.

CAPÍTULO 3

FIBRAS NATURAIS

A caracterização acústica de materiais porosos ou fibrosos é comumente realizada em materiais sintéticos, tais como as espumas sintéticas ou fibra de vidro, metálicas, lã e rocha. Entretanto, este estudo, realizou a caracterização acústica das fibras naturais, para aquisição de suas propriedades. O coco, o sisal e a cana-de-açúcar são plantas adaptadas ao clima do país e abundantes em quase todas as Regiões do Brasil e, por consequência, o acesso a fibra dessas plantas é viabilizado, o que torna fácil a gestão para a fabricação de amostras.

3.1 FIBRAS DE ESTUDO: COCO, SISAL E CANA-DE-AÇÚCAR

3.2 FIBRA DE COCO

O coqueiro é da ordem das *Palmales*, família das *Arecaceae* e gênero dos *cocos nucifera* L. O coqueiro é de origem Asiática, introduzido no Brasil em meados de 1553. As espécies de coqueiro predominantes no país são: Gigante (*typica*), Anão (*nana*) e Híbrido (anão-gigante), disponível no site de Daniel Motaba¹.

A variedade de coqueiro gigante se caracteriza por produzir cocos a partir de seis anos e meio, sendo uma produção média de 70 frutos por ano e produção da copra (polpa seca e branca). O coqueiro anão tem produção do fruto a partir de dois anos e meio com média de 120 frutos por ano, com melhor capacidade de produção de água. O híbrido possui as características das duas variedades citadas (anã e gigante), permitindo a exploração tanto da copra quanto da água.

¹ Disponível em <<https://pt.slideshare.net/danielmotaba/prof-luiz-henrique-cultivo-do-coqueiro-41059060>, acesso em 2016>.

O clima ideal para que o coqueiro gere frutos deve apresentar sol e chuvas abundantes com temperatura ambiente de até no mínimo 18° Celsius. Temperaturas menores que esta poderá desfavorecer o desenvolvimento da planta e do fruto.

Em quase toda extensão do Brasil, há condições para plantação do coqueiro. Segundo o Levantamento Sistemático da produção Agrícola LSPA² e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE³, as regiões onde há maior predominância do plantio de coco são as do Norte e Nordeste, que, juntas, possuem a maior parcela da produção nacional, chegando a 86,9%. As demais regiões somam 13,1%. Segundo a Embrapa, estima-se que no Brasil há uma área de 290 mil hectares de terra para produção de coco e que, dentro desse sítio, existem variedades de coco distribuídas desde o Equador até o Trópico de Capricórnio, sendo que 10% dessa área é constituída de coqueiros híbridos, 20% com variedade anã (anão verde) e 70% com a variedade coco gigante.

Tabela 1: Levantamento sistemático da produção agrícola, coco.

Regiões do Brasil	Produção de coco (%)
Norte	12,8
Nordeste	74,1
Centro-oeste	01,0
Sudeste	11,9
Sul	0,2

Fonte: Extraído de - LSPA e IBGE, 2017.

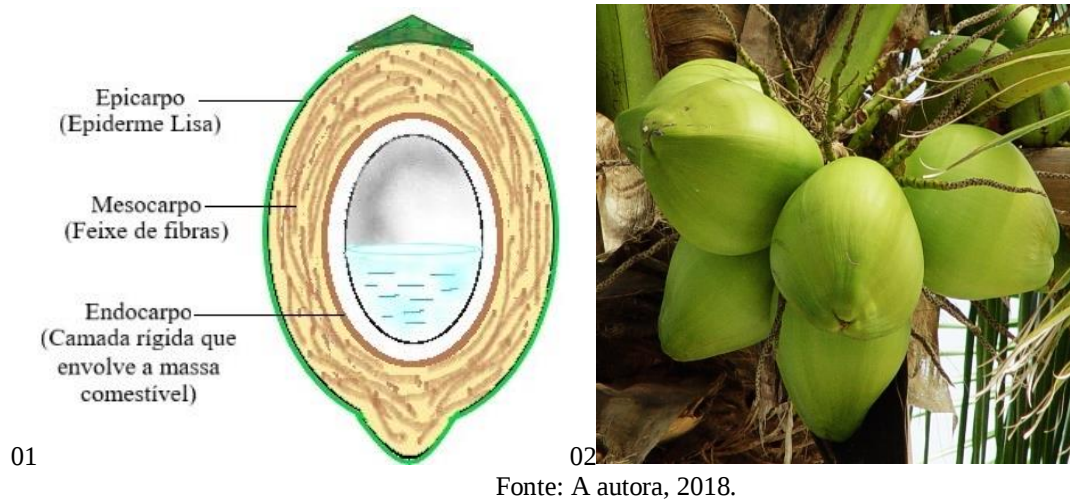
3.2.1 A extração da fibra do coco

A fibra do coco pode ter características diferentes, dependendo da espécie do fruto, pois o seu mesocarpo pode apresentar menos ou mais fibras. Comumente, o coco verde é o mais utilizado para extração da fibra, pois a sua casca apresenta um mesocarpo mais fibroso, sendo, portanto, útil para fabricação de artefatos. Por essa matéria ser encontrada em grande escala no país, há um histórico de produção de artesanatos feitos a partir dessa fibra, que varia desde bolsas à xaxim.

² Disponível em <LSPA//ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/2017/lspa_201701.pdf>

³ Disponível em <IBGE https://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201707_2.shtm>

Figura 1: Desenho esquemático do corte transversal do coco e suas partes em 01 e imagem real do coco gigante ou coco verde em 02.



Para a fabricação de amostra acústica, a fibra deve conter o mínimo de resíduos, pois quanto mais fibra e menos detrito, melhor será a qualidade da amostra, uma vez que o procedimento para produção de qualquer artefato exige que a fibra esteja limpa o suficiente para não comprometer o resultado do material produzido. Para a acústica, a característica natural da fibra, que não é uniforme no tamanho e nem no seu comprimento, contribui para boa aquisição de resultados. Estudos feitos na EMBRAPA⁴ afirmam que as fibras longas e curtas, consideradas mistas, têm utilidades como isolante termo acústico.

Figura 2: Embalagem com Fibra de coco e resíduos na parte inferior do pacote provenientes do Mesocarpo.



Fonte: A Autora, 2017.

⁴ Disponível em <www.agencia.cnptia.embrapa.br>

3.3 FIBRA DE SISAL

O sisal é uma planta característica da família cactáceas, gênero da *Agave* e espécie *A. sisalana*, sendo oriunda do México e conhecida no mundo pela sua importância no artesanato, em diversos ramos da agricultura e num contingente nos setores da indústria. No Brasil, o sisal foi originalmente introduzido na Bahia em 1903 e difundido, no final da década de 30, nos estados de clima quente e semiáridos em que se adaptaria melhor, por ser uma planta altamente resistente a estiagens prolongadas. Hoje, o Brasil é o maior produtor e exportador de sisal. Segundo o *Rank Brasil*⁵, o país produz aproximadamente 245 mil toneladas de fibra vegetal por ano e o Estado responsável pela maior produção é a Bahia, com 95% da produção nacional, sendo o sisal cultivado em 75 municípios, com área total de 190 mil hectares.

Figura 3: Plantação de Sisal destinado para exportação.



Fonte: Pesquisado em, <http://portalnoar.com.br/sisal-potiguar-sera-exportado-para-os-eua-ate-o-fim-de-janeiro/>, 2018.

3.3.1 A extração da fibra do sisal

O sisal apresenta folhas estreitas, achatadas, com espinhos e compridas, medindo entre 10 a 15cm de largura e de 120 a 160cm de comprimento. Sua fase de colheita é quando a planta atinge 3 anos de vida e suas folhas alcançam cerca de 140cm, para poder resultar em fibras de 90 a 120. As folhas são cortadas a cada 6 meses durante o ciclo de vida da planta, que dura de aproximadamente 7 anos. No final desse ciclo, o sisal está pronto para uma nova reprodução; então, a planta morre após a gerar a semente na haste da inflorescência.

⁵ Disponível em <www.rankbrasil.com.br>

Figura 4: Processo manual de desfibramento da folha do sisal.



Fonte: pesquisado em, <http://www.hamiltonrios.com.br/extracao-do-sisal.php>, 2018.

Figura 5: Fibra de sisal no processo de secagem e após o desfibramento.



Fonte: Pesquisado em, <http://agnaldocruz.blogspot.com/2012/03/regiao-sisaleira-agoniza.html>, 2017.

Segundo Hamilton Rios⁶ as fibras representam apenas de 4 a 5% da massa bruta da folha, sendo, o restante, polpa ou mucilagem que envolve a fibra da folha. Para extração da fibra, é necessário iniciar o desfibramento para obter 96% de resíduo (15% de mucilagem, 80% de suco, 1% de bucha) e 4% de fibra. Após isso, as fibras são colocadas em varais de arame para secarem ao sol. Quando seca, a fibra passa por um processo de batimento para retirada do pó e resíduos que envolvem a fibra. Esse processo é feito em máquinas denominadas batedeiras; após isso, a fibra é enfardada para ser comercializada.

Apesar da importância do sisal, principalmente na região nordeste, de clima semiárido e onde há poucas alternativas econômicas, o desempenho da produção vem declinando nos últimos anos, sobretudo pelo pouco aproveitamento da planta, que está ligado a extração da

⁶ Disponível em <<http://www.hamiltonrios.com.br>>

fibra que atinge apenas de 3 a 4% da folha planta. O declínio se deve também ao baixo valor pago pela fibra, à falta de tecnologia atualizada para a colheita, a longos períodos de estiagem e a competição da fibra sintética. No início deste ano, o IBGE readequou o primeiro prognóstico e a estimativa da safra de 2018, reduzindo as produções agrícolas de 36 para 27 itens. O sisal está dentre os itens agrícolas retirados, sendo considerado de pouca relevância econômica.

Tabela 2: Tabela de alguns produtos agrícolas que perderam relevância econômica no país em 2018.

Estimativa da safra 2018		Estimativa da safra 2018	
Mantidos	Retirados	Mantidos	Retirados
Algodão	Abacaxi	Algodão	Aveia
Arroz	Coco	Arroz	Amendoim
Cevada	Sisal	Feijão	Centeio
Banana	Maçã	Cana-de-açúcar	Cevada
:	:	:	:

Fonte: Extraído de IBGE, 2018.

Os subprodutos que são gerados após o desfibramento são pouco aproveitados, podendo ter inúmeras utilizações como complemento alimentar bovino e caprino, adubo orgânico, cosmético e bioinseticida. Além das vantagens apresentadas, o sisal ganha espaço no estudo de caracterização de materiais para a acústica, pois deve-se levar em consideração a questão da preservação ambiental. A fibra tem seus benefícios quando descartada na natureza, tornando-se fertilizante natural, ao contrário da fibra sintética, que leva em torno de 150 anos para começar a se decompor.

3.4 FIBRA DE CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar se caracteriza por ser da espécie das gramíneas perenes altas do gênero *Saccharum* e da família *Poaceae*. A planta apresenta entre dois a seis metros de altura quando atinge o tempo de colheita; seu caule fibroso e articulado é rico em sacarose. Sua origem é das regiões tropicais do Sul da Ásia e da Melanésia. Hoje, o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo é o Brasil. Quando o caule da gramínea é extraído, fábricas especializadas e pequenos empresários utilizam-na como matéria prima na indústria e produção de alimentos. Outros diferentes processos para o uso da cana-de-açúcar são direcionados para produção de bebidas, combustíveis, álcool, e, dentre outros destaques, a geração de energia com o uso do bagaço da

cana quando queimada em termoelétricas. O açúcar e o etanol são os principais derivados da cana-de-açúcar, em escala mundial. EMBRAPA 2017⁷.

O plantio da cana-de-açúcar se concentra em grande escala nas regiões centro-oeste e sudeste e em pequenas proporções nas demais regiões do país. Em 2017, a quantidade produzida no Paraná, segundo o IBGE, foi de 47.368 toneladas. A Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) afirma que a safra de cana-de-açúcar no Brasil para os anos de 2017 e 2018 é de 648 milhões de toneladas e que, nos anos de 2016/2017, foi de 657 milhões de toneladas, demonstrando um mercado favorável. Dados da Conab asseguram que, devido a redução da safra na Índia e a abertura de novos mercados na União Europeia, a cana-de-açúcar no Brasil aumentará a área de cultivo.

Figura 6: Mapa da distribuição do plantio de cana-de-açúcar no País.



Fonte: Extraído de IBGE, 2015.

⁷Disponível em <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar>>

Segundo a FAPESP (2017)⁸, em cada ano, a produção de resíduos varia de 5 a 12 milhões de toneladas, que corresponde aproximadamente a 30% da cana moída. Mesmo que o resíduo seja utilizado na fabricação de aglomerados, na indústria química, como material alternativo da construção civil, ração de animais, há um excedente não utilizado, o que causa sérios problemas de estocagem. As Tabelas 3 e 4, com os dados do IBGE, apresentam a produção de 2015 da gramínea no Estado do Paraná e, em seguida, o levantamento sistemático da produção agrícola no Brasil.

Tabela 3: Produção agrícola temporária no estado do Paraná, levantamento de 2015.

Cana-de-açúcar	Qtd	Un.
Quantidade produzida	47.368	t
Valor da produção	2.601.666	(x1000) R\$
Área plantada	626	ha
Área colhida	626	ha
Rendimento médio	76	Kg/ha

Fonte: Extraído de IBGE, 2015.

Tabela 4: Produção agrícola no Brasil, levantamento de julho de 2017.

Produtos agrícolas	Produção (t)		
	Junho	Julho	Variação
Algodão	3.639	3.711	2
Amendoim	541	544	0,5
Café- Arábica	2.200	2.234	1,5
Cana-de-açúcar	703.339	712.052	1,2
Cevada	419	443	5,7

Fonte: Extraído de IBGE, 2017.

3.4.1 A extração da fibra da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é a principal matéria prima para a indústria sucroalcooleira brasileira e sua contribuição vai desde o setor de bebidas aos estudos empregados na acústica. O processo industrial pelo qual a cana-de-açúcar passa é essencial para a produção de seus derivados e principalmente para a produção de resíduos (o bagaço), que é o elemento principal da cana-de-açúcar para o estudo desta dissertação.

⁸ Disponível em <<http://revistapesquisa.fapesp.br/1998/04/01/propriedades-do-bagaco-da-cana-de-acucar/>>

Na acústica, a produção das amostras de cana-de-açúcar é fabricada a partir dos resíduos e, para obter esses resíduos fibrosos, é necessário que a cana passe por três processos industriais que irão iniciar a produção de açúcar e etanol/álcool (e derivados). Após os processos de extração, o resíduo é gerado e, a partir disto, é possível utilizar esse bagaço para fabricação de amostras acústicas. A Figura 7 apresenta dois momentos, dentre vários, pelo o qual a cana-de-açúcar passa, sendo a imagem 01 o processo de limpeza e retirada das impurezas, e a imagem 02 a fibras da cana-de-açúcar como resíduo pronto para ser utilizado para fabricação das amostras. Os procedimentos industriais iniciais são:

- a. Lavagem da cana;
- b. Preparo para moagem ou difusão;
- c. Extração do caldo: moagem ou difusão.

Figura 7: Lavagem da cana-de-açúcar para retirada das impurezas em 01 e o resíduo da cana-de-açúcar.



Fonte: Em 01, extraído de Embrapa, 2017. Imagem 02, A autora, 2018.

CAPÍTULO 4

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conhecimento básico dos fenômenos físicos que regem a propagação das ondas sonoras é fundamental para o entendimento da acústica dos materiais, partindo de conceitos importantes como normas, métodos de caracterização de materiais absorventes e equações, que são mencionados neste capítulo.

4.1 CONCEITOS BÁSICOS

4.1.1 Som e Ruído

O som e o ruído são determinados por variações de pressão ou vibração de partículas no ar, que, quando emitidas, produzem uma sensação no sistema auditivo, ambos sendo oriundos de vários mecanismos de estrutura vibrante. O senso comum caracteriza o som como uma percepção subjetiva das sensações humanas, considerado como agradável ao sistema auditivo. O ruído, entretanto, como um som sem harmonia, pode parecer perturbador conforme o contexto em que o ouvinte se encontra (GERGES, 2000; BISTAFA, 2006).

O som é definido por três características intrínsecas: a velocidade do som “ c ”, a frequência “ f ” e o comprimento de onda λ . A velocidade do som c em [m/s] no ar é fornecida pela equação (1) (MORAN & SCHAPIRO, 2013).

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (1)$$

Em que,

γ é a razão de calores específicos a pressão e volume constante do meio;

P é a pressão dinâmica do meio em [Pa];

ρ é a densidade do meio em [kg/m³].

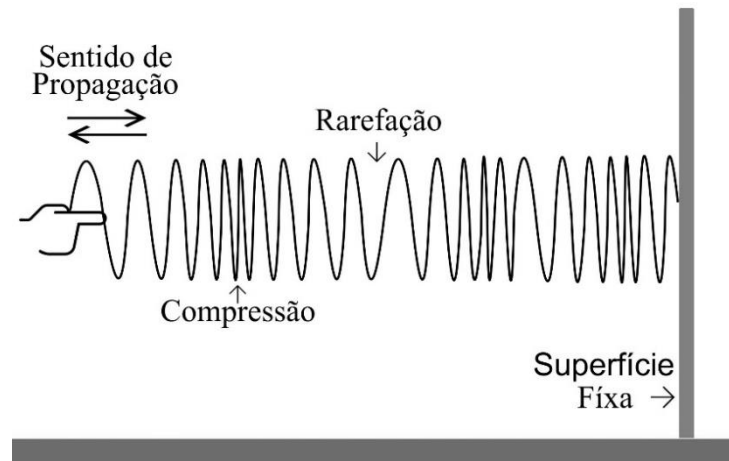
A frequência f em [Hz] e o λ em [m] são calculados através das equações (2) e (3), respectivamente.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

A onda sonora, por ser uma onda mecânica, precisa de um meio para se propagar (sólido, líquido ou gasoso) e se difundir de forma longitudinal, Figura 8.

Figura 8: Onda longitudinal se propagando em uma corda.



Fonte: A autora, 2018.

4.2 NATUREZA DO SOM

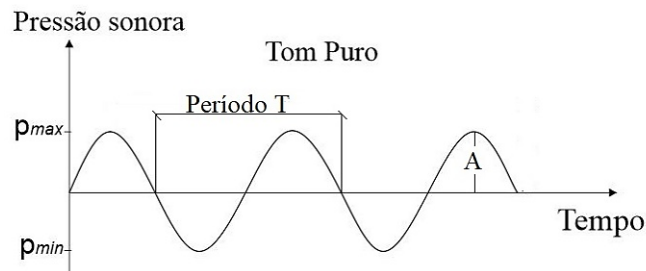
4.2.1 Frequência

A frequência, equação 2, é definida como número de vibrações completas de um ciclo que uma onda executa por um segundo. As faixas de frequências audíveis ao homem estão entre 20 Hz a 20 kHz, sendo calculadas nos períodos de 50 ms e 50 μ s; no entanto, os sons não audíveis estão abaixo de 20 Hz, denominados como infrassons. Sons acima de 20 kHz, como ultrassons, não audíveis ao homem, possuem movimentos vibratórios das partículas no meio em que propagam e são idênticos a fonte origem (GERGES, 2000; BISTAFA, 2006).

4.2.2 Forma da onda

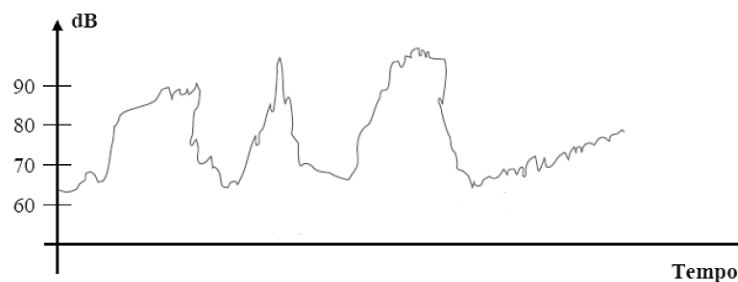
O som se caracteriza pelo deslocamento das partículas, que pode ser descrito em forma de onda. A onda sonora apresenta curvas periódicas. Isto ocorre através dos deslocamentos das partículas nas coordenadas cartesianas. Esta é formada por um período T , com o tom puro e o número de pico ($P_{\text{pico}}=A$), assinalando a forma de onda em Tom puro, Figura 9, ou em Ruído, Figura 10. Entretanto, a forma da onda no ruído apresenta uma infinidade de picos e os que se destacam possuem maiores amplitudes (BISTAFA, 2006). O tom puro, gerado por movimento oscilatório, é considerado como a onda mais simples, que pode ser emitida de um diapasão; seu movimento gera uma curva que traduz a forma da onda.

Figura 9: Curva periódica que traduz o som puro.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 10: Representação de uma onda sonora que traduz o Ruído, Ruído flutuante.



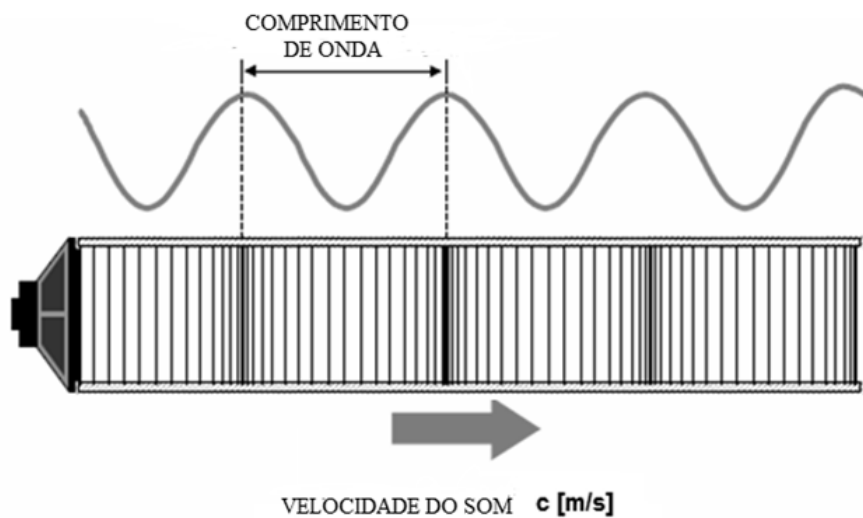
Fonte: Fernandes, J. C., Acústica e Ruídos, UNESP, 2009.

O ouvido humano é capaz de distinguir um som devido à intensidade dos harmônicos que define um timbre e às numerosas vibrações harmônicas, o que faz que a forma da onda não seja senoidal. A análise de sons harmônicos e fundamentais permite ao ouvido a distinção entre sons e ruídos, dando adjetivos que os qualificam de forma subjetiva como agradáveis ou desagradáveis.

4.2.3 Onda plana

A onda plana se propaga ao longo do eixo x , sendo caracterizada por apresentar a mesma fase para cada superfície plana composta por inúmeras “moléculas” de ar. Assim, obtém a mesma amplitude ao longo de uma superfície plana, ou seja, perpendicular ao vetor de propagação de onda. Um exemplo de onda plana é a propagação de uma onda sonora gerada por um alto falante dentro de um tubo, Figura 11.

Figura 11: Propagação da onda plana dentro de um tubo.



Fonte: Adaptado- Environmental Noise – Brüel&Kjaer (2000).

4.2.4 Pressão sonora

A natureza do som o define como uma variação de pressão detectada pelo sistema auditivo humano. No entanto, a audição do homem tem uma limitação com variação menor que $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, chamado de limiar da audição (GERGES, 2000; BISTAFÁ, 2006). O limiar da dor, em ambientes, é determinado em diferentes valores que variam de 20 até 200 Pa, em que a variação da pressão ocorre de forma cíclica em função do tempo. Essa variação em ambiente pode ser calculada com a igualdade da diferença da pressão máxima (p_{max}) e pressão mínima (p_{min}). As Figuras 9 e 10 mostram os exemplos de um tom puro se propagando no ar e o espectro de um ruído industrial composto por vários tons.

Uma onda senoidal é dada pelo comportamento espacial da pressão sonora $p(x)$ descrito em cada ponto da onda sonora, sendo dado pelo cosseno da amplitude sonora A . Logo, uma onda senoidal pode ser descrita como:

$$p(x) = A \cos(k \cdot x) \quad (4)$$

Em que, A é amplitude da onda sonora em [Pa];

k é número da onda em propagação e vale $k = \omega/c$ [1/m];

$\omega=2\pi f$ é a frequência angular da onda em propagação em [rad/s];

4.2.6 Nível de potência sonora

O conceito de potência está relacionado com a energia com que o som chegará aos estímulos auditivos percebidos pelo ser humano, sendo inerente à fonte sonora e independente do ambiente sonoro. Potência sonora é a energia acústica total emitida por uma fonte sonora por unidade de tempo, sendo a definição física do nível de potência sonora, *Sound Power Level* (L_w), é dada por (BARRON, 2003; MUNJAL, 2013):

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (5)$$

Em que W é a potência sonora da fonte e W_0 a potência sonora de referência que vale 10^{-2} [W].

4.2.7 Nível de pressão sonora

O Nível pressão sonora foi descrito no início deste capítulo, relacionando-a como um estímulo auditivo percebido pelo ser humano, sendo tomada como o limiar da audibilidade, na qual há a relação entre a pressão sonora eficaz com a pressão de referência. O nível de pressão sonora, *Sound Pressure Level* (L_p), em Pa (Pascal) é dado por (MUNJAL, 2013):

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (6)$$

Em que, p_0 é a pressão de referência para o ar é igual a $2 \cdot 10^{-5}$ [Pa].

4.2.8 Nível de intensidade sonora

O nível de intensidade sonora, *Sound Intensity Level* (Li), é diretamente proporcional a potência sonora e é definido em W(watts), dado como:

$$Li = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (7)$$

Onde, a intensidade sonora inicial para o ar é igual a $I^o = 10^{-2} \text{ [W/m}^2\text{]}$.

4.2.9 Equação da onda unidimensional

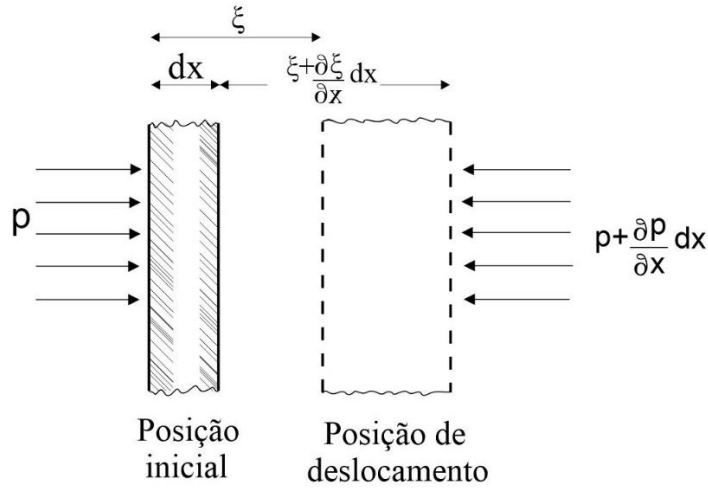
A onda unidimensional se caracteriza por ser uma onda plana, sendo a onda mais simples, que se propaga através de meios fluidos. Uma das propriedades mais importantes da onda é a pressão acústica e o deslocamento da partícula, tendo as mesmas amplitudes em todos os pontos de qualquer plano perpendicular à direção de propagação. A equação da onda, fisicamente escrita, é fundamental para descrever vários princípios para o controle do ruído. Entretanto, esta equação tem duas restrições. A **primeira restrição** pertence aos efeitos negligenciados de energia dissipativa e a **segunda restrição** é a pressão da amplitude da onda, que deve ser menor que a pressão atmosférica, segundo Barron (2003). Quando atendidas essas restrições por técnicas físicas, o resultado da análise é amplamente útil para soluções do domínio do ruído.

A **primeira restrição** (BARRON, 2003) é dada considerando o desprezo das forças de fricção, e a única força que atua no fluido é dada como pressão; logo, as forças líquidas Fl , resultantes em um elemento, são dadas:

$$Fl = pS - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) S = - \frac{\partial p}{\partial x} dx S \quad (8)$$

O som gerado por uma onda plana é transmitido na direção x (BARRON, 2003), com uma camada de fluido de espessura de dx e uma área de superfície de S . A velocidade da partícula que passa por um dado material em camada é modificada conforme o seu deslocamento por unidade de tempo, Figura 12.

Figura 12: Posição inicial e de deslocamento de um fluido que passa como onda sonora através de um elemento qualquer.



Fonte: Adaptada, Randall F.Barron, 2003.

Em que ξ é o deslocamento da partícula instantânea, x a nova direção, dx é a espessura, p é a pressão acústica instantânea. A velocidade da partícula u , que passa por um material em camada, é calculada como a razão do deslocamento da partícula ξ com o tempo t , equação (9), e a aceleração da partícula a é calculada pela equação (10), tais como:

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (9)$$

$$a = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (10)$$

A pressão acústica p , (MUNJAL, 2013), é considerada como uma solução equivalente para o comportamento das outras variáveis acústicas, em que:

$$p = -\rho c^2 \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right) \quad (11)$$

A densidade ρ é dada pela razão da massa pelo volume $\rho = m/v$ e a massa específica por unidade de volume de uma pequena camada é dada como:

$$dm = \rho S dx \quad (12)$$

Para uma substituição na segunda lei de Newton, $F=m.a$, com a equação (12) resultará na equação da onda em sua forma diferenciada:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (13)$$

A forma final da equação da onda (13) pode ser escrita, em termos da pressão sonora, com diferentes variáveis. A velocidade do som em um fluido qualquer, tomado em uma constante de entropia, pode ser determinada na seguinte derivada:

$$c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{\partial p}{\partial t} / \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (14)$$

ou,

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (15)$$

A propriedade condensação $\mathcal{C}$ pode ser definida como uma mudança fracionária na densidade do fluido não perturbado ρ_0 (usado na pressão atmosférica), com a densidade do fluido perturbado ρ , de forma que:

$$\mathcal{C} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (16)$$

Em termos de deslocamento da partícula e a variação do volume, a condensação pode ser reescrita como:

$$\mathcal{C} = \frac{V_0 - V}{V} = \frac{S - dxS \left(dx + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx \right)}{\left(dx + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx \right) S} = - \frac{\frac{\partial \xi}{\partial x}}{1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}} \quad (17)$$

Em que V_0 é o volume inicial do elemento e V o volume final do elemento após a perturbação da onda.

A **segunda restrição**, (BARRON, 2003; MUNJAL, 2013), é dada como o deslocamento muito pequeno da partícula no fluido, em que $\frac{\partial \xi}{\partial x} \ll 1$, e com isto, a condensação pode ser reescrita como a equação (18):

$$C = -\frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (18)$$

A densidade do fluido pode ser escrita em termos da condensação unido a equação (16) com a equação seguinte:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_0 \frac{\partial C}{\partial t} \quad (19)$$

O resultado na equação (15) resultará na seguinte equação (20). Levando a segunda derivada parcial de ambos os lados, resultará em (21):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_0 c^2 \frac{\partial C}{\partial t} \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \rho_0 c^2 \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} \quad (21)$$

Induzindo a segunda derivada parcial da equação (13) e assumindo que o deslocamento é muito pequeno e a densidade praticamente constante em que $\rho = \rho_0(1 + C) \approx \rho_0 = \text{constante}$, resultará na equação (22):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -\rho_0 \frac{\partial^3 \xi}{\partial t^2 \partial x} = -\rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (22)$$

Simplificando com a equação (18), tem-se a equação (23):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = +\rho_0 \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} \quad (23)$$

Comparando as equações (21) e (23), a equação da onda é obtida em termos da pressão acústica instantânea; essa equação representa a equação da onda unidimensional.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (24)$$

Em termos do deslocamento da partícula instantânea, a equação pode ser escrita da seguinte maneira, (MUNJAL, 2013):

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (25)$$

Solução da equação da onda harmônica

Uma maneira de solucionar a equação da onda, segundo Gerges (2000), é dada pela resolução geral da equação (26), em que:

$$P = F^1(ct - x) + F^2(ct + x) \quad (26)$$

Sendo a pressão sonora das ondas harmônicas formada em números complexos, em que A é a amplitude complexa de pressão de uma onda plana de frequência angular ω , e o número de onda é $k=\omega/c$, propagando no sentido positivo de x , com velocidade do som c . E B é considerado a amplitude complexa da onda propagando no sentido negativo de x . Dado por:

$$P = Ae^{i(\omega t - kx)} + Be^{i(\omega t + kx)} \quad (27)$$

A velocidade da partícula u equação (29) e (30), deslocamento da partícula ξ , equação (31) e (32), e a condensação relativas das ondas C equação (33) e (34) são dadas conforme o desmembramento da equação (28), gerando P_+ e P_- :

$$P_+ = Ae^{i(\omega t - kx)} \text{ e } P_- = Be^{i(\omega t + kx)} \quad (28)$$

$$u_+ = \frac{A}{\rho c} e^{i(\omega t - kx)} \quad (29)$$

$$u_- = -\frac{B}{\rho c} e^{i(\omega t + kx)} \quad (30)$$

$$\xi_+ = -\frac{iA}{\rho c^2 k} e^{i(\omega t - kx)} \quad (31)$$

$$\xi_- = -\frac{iB}{\rho c^2 k} e^{i(\omega t + kx)} \quad (32)$$

$$C_+ = \frac{A}{\rho c^2} e^{i(\omega t - kx)} \quad (33)$$

$$C_- = \frac{B}{\rho c^2} e^{i(\omega t + kx)} \quad (34)$$

Estes modelos complexos revelam que, quando estão no sentido positivo, a pressão acústica, a condensação e a velocidade da partícula ficam em fase e antecedem o deslocamento por um quarto de um ciclo de 90° do ângulo de fase. Quando as ondas se movem no sentido negativo de x , a velocidade da partícula precede o deslocamento por 90° ; porém, a condensação e a pressão ficarão retardadas por 90° do deslocamento (BARRON, 2000; MUNJAL, 2013).

Independente da direção de propagação da onda, a pressão e a condensação são associadas a velocidade da partícula na direção de propagação da onda. Nos casos em que A e B são constantes, considere as seguintes equações para pressão acústica P , deslocamento da onda ξ , condensação C e velocidade da partícula u :

$$P = A \cos(\omega t - kx) + B \cos(\omega t + kx) \quad (35)$$

$$\xi = \frac{A}{\rho c^2} \sin(\omega t - kx) - \frac{B}{\rho c^2} \sin(\omega t + kx) \quad (36)$$

$$C = \frac{A}{\rho c^2} \cos(\omega t - kx) + \frac{B}{\rho c^2} \cos(\omega t + kx) \quad (37)$$

$$u = \frac{A}{\rho c} \cos(\omega t - kx) - \frac{B}{\rho c} \cos(\omega t + kx) \quad (38)$$

A impedância acústica específica $\tilde{Z}$ da onda plana é definida como a razão entre a pressão acústica no meio e a velocidade da partícula. Esta impedância depende do meio e do tipo de onda (plana, cilíndrica, etc). No caso de ondas propagando-se no sentido positivo de x , é gerada a equação a seguir:

$$\tilde{Z}_+ = \frac{P_+}{u_+} = \rho c \quad (39)$$

Para ondas planas que se propagam em direção negativa de x , é dado como (40), e seu valor real de magnitude ρc [Pa·s/m $\equiv$ Rayl]:

$$\tilde{Z}_- = -\rho c \quad (40)$$

Para ondas divergentes, o valor da impedância é em geral complexo, dado por:

$$Z = \frac{P}{u} = r + ix \quad (41)$$

Em que r é a resistência acústica específica é dada por $r = \pm \rho c$, representando a parte real da impedância acústica e x a reatância acústica específica $x = 0$ sendo a componente imaginária. Para ondas planas progressivas, a reatância será igual a zero. Para impedância característica no ar Z_{ar} , em condições normais de temperatura (20° C), densidade do ar $\rho_0=1,21[\text{kg/m}^3]$ e a velocidade do som $c=343$ [m/s], a equação é calculada por:

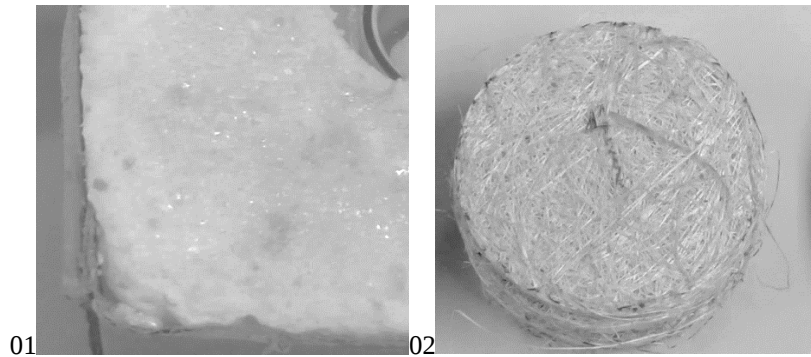
$$Z_{ar} = \rho_0 c \text{ (Pa.s/m)} \quad (42)$$

$$(\rho_0 c)_{20} = 415,03 \quad (43)$$

4.2.10 Coeficiente de absorção sonora (α)

O coeficiente de absorção sonora é determinado quando há dissipação de energia (ondas sonoras) nas paredes interna de um material poroso e fibroso, transformando-a em calor. Em materiais porosos, essa incidência se dá por inúmeras reflexões e atritos viscosos, e, com isso, a energia sonora se transforma em energia térmica. Em materiais fibrosos, a energia sonora incidente entra por fendas provocadas pelas fibras do material, ocasionando uma vibração junto com o ar e gerando um atrito entre as fibras, com isso dissipando a sua energia sonora, transformada em energia térmica (SELAMET, 2005).

Figura 13: Material poroso de Poliuretano expandido, imagem 01 e Fibra natural de sisal, imagem 02.



Fonte: A autora, 2018.

Estes materiais permitem que haja uma passagem de fluxo de ar no seu interior, acarretando possíveis propagações de ondas acústicas pelo ar dos poros ou pelas fendas das fibras. Materiais que possuem alto coeficiente de absorção α são considerados bons absorvedores sonoros. O coeficiente de absorção é definido pela razão entre a energia acústica absorvida W_a e a energia acústica incidente W_i .

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (44)$$

O valor do coeficiente de absorção sempre será positivo, podendo variar de zero a um ($0 \leq \alpha \leq 1$) e depende: da frequência, ângulo de incidência do som, tipo do campo sonoro (difuso, ondas planas, etc.), densidade, espessura e estrutura interna do material (BISTAFA, 2006; GERGES, 2000). Para análise de materiais e ou para quantificar suas características internas, são usados vários parâmetros, entretanto, nesta dissertação serão mencionados quatro parâmetros importantes: Resistividade ao fluxo σ , Tortuosidade α_∞ , Porosidade Ω e Impedância acústica Z .

As equações empíricas de Delany & Bazley (1970) apresentam apenas dois tipos de experimentos para chegar a solução do coeficiente de absorção, sendo a resistividade ao fluxo e a impedância acústica. As principais faixas de frequência para esse modelo estão em $0.01 \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1.00$. Este modelo será melhor detalhado nas técnicas de medições, Capítulo 6.

Champoux & Allard (1991) apresentaram uma formulação em que utilizaram a proposta de Johnson *et al.* (1987), em que consideraram em sua equação o comprimento viscoso Λ para reagir a uma resposta de um fluido Newtoniano, que satura um corpo amostral de meio poro, rígido e isotrópico. Utilizaram uma amostra, em que foi sujeita a uma oscilação infinita de pressão, estabelecendo um modelo de propagação do som em meios porosos. O modelo de Allard & Champoux teve como base parâmetros macroscópicos, independe da frequência e descreve características acústicas do material. Este modelo propõe o uso de quatro métodos experimentais diferentes: Impedância Característica Z_c , Resistividade ao Fluxo σ , Porosidade Ω e Tortuosidade α_∞ .

Nele, a densidade característica através de ρ_c é igual a:

$$\rho_c = \rho_0 \alpha_\infty \left[1 + \frac{\sigma \Omega}{i \alpha_\infty \rho_0 \omega} \left(1 + \frac{4 i \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \Omega^2} \right)^{1/2} \right] \quad (45)$$

E o modulo de *bulk* ou *bulk modulus* é dado por:

$$K = \frac{\gamma \rho_0}{\left[\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 - \frac{\sigma \Omega}{i \alpha_\infty \rho_0 N_{pr} 2 \omega} \left(1 + \frac{4 i \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 N_{pr} \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \Omega^2} \right)^{1/2}} \right]} \quad (46)$$

A definição de γ como calor específico, ρ_0 é a densidade do ar, σ a resistividade ao fluxo, N_{pr} número de *Prandtl*, Ω porosidade do material, α_∞ tortuosidade, η viscosidade do ar, ω frequência angular ($\omega=2\pi f$) e Λ comprimento viscoso. Com isso, é possível calcular a impedância característica Z_c e o número de onda característico k_c da amostra porosa, respectivamente:

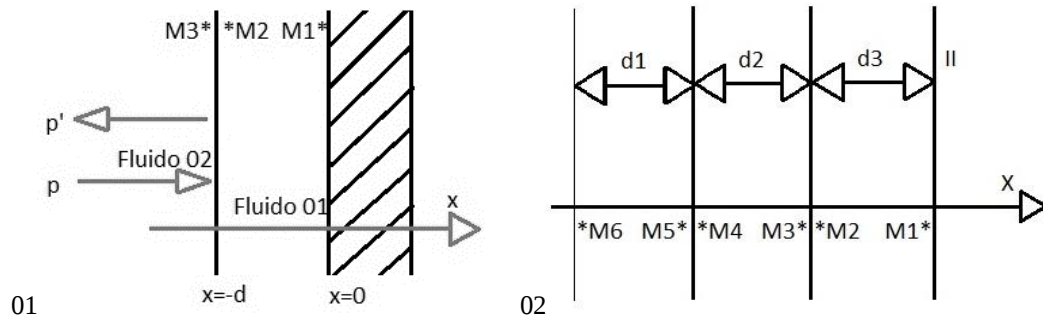
$$Z_c = \sqrt{K\rho_c} \quad k_c = \sqrt{i2\pi f(\rho_c K)} \quad (47)$$

Em seguida, calcular a impedância de superfície, o coeficiente de reflexão e o coeficiente de absorção da amostra.

$$Z_s = -jZ_c \cotg k_c l \quad (48)$$

O Z_s representa a impedância característica na superfície e k_c o número de onda constante no meio fluido; a pressão e a velocidade são constantes nos limites das superfícies; como exemplo, a Figura 14, que ilustra a impedância de M3 igual a impedância M2, a velocidade e pressão são as mesmas em ambos os lados do limite. Na Figura 14, imagem 01, apresenta a camadas de fluidos de espessuras finitas em contato com outro fluido na frente de uma face traseira apoiada numa superfície plana impermeável. Na imagem 02 da Figura 14, apresenta três camadas de fluidos apoiados em uma impedância II (ATALLA - ALLARD, 2009).

Figura 14: Camadas de fluidos de espessuras finitas em contato com uma superfície plana impermeável.



Fonte: Adaptado, Jean F. Allard e Noureddine Atalla (2009).

4.2.11 Resistividade ao fluxo (σ)

Quando um determinado fluxo de ar passa por um material poroso ou fibroso, este material terá, como consequência, a possibilidade de propagar ondas sonoras através do ar que passa em seus poros e cavidades no interior de um material. A resistividade ao fluxo σ é normatizada pela *American Society for Testing and Materials* – ASTM – C 522-03 (2010), que orienta e padroniza a construção de uma bancada para experimentação e a preparação de amostras, o que será mencionado com detalhes no Capítulo 5. A resistência ao fluxo específica,

que não depende da espessura para ser calculada, é representada por R_0 e calculada em mks (metro-kg (quilograma)-segundo) ou em Pa.s/m, sendo expressa por:

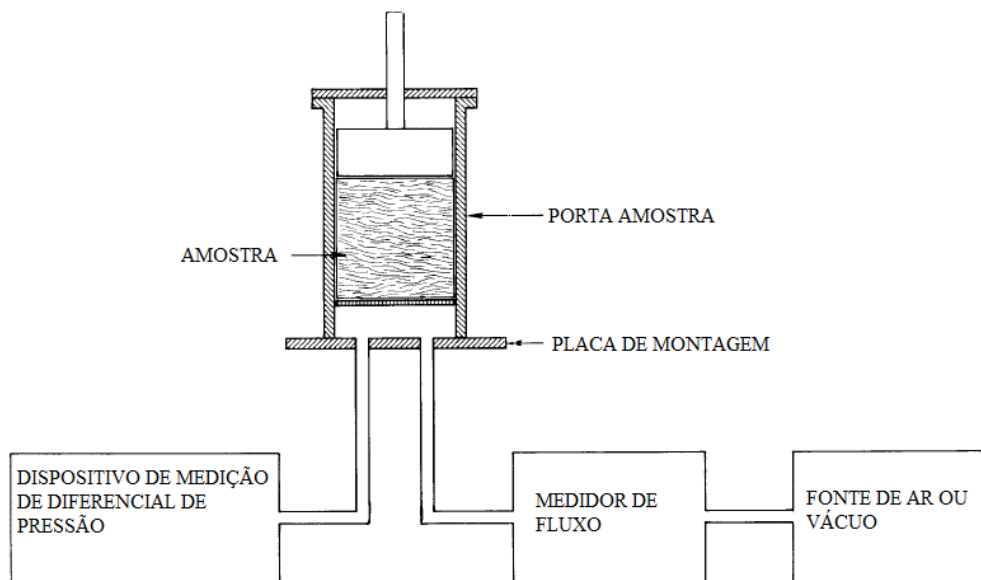
$$R_0 = \frac{P}{v} \quad (49)$$

Em que P é a pressão do ar em [Pa.s/m] em várias leituras feitas em amostras, sendo R a região onde ocorre o fluxo de ar laminar no corpo amostral. A pressão que passa na amostra, localizada dentro do tubo de resistividade ao fluxo, é notada pela variação de pressão ΔP do ar medida nos dois lados da amostra; v é a velocidade do ar perpendicular [m/s] à superfície da amostra. A resistividade ao fluxo σ de uma amostra é definida pela razão da variação de pressão com a velocidade do ar e a espessura do material l [m], considerando σ em unidade para [Rayl/m] ou [Pa.s/m²]:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{vl} \quad (50)$$

Os valores de resistividade ao fluxo no experimento devem atingir de 100 a 10 000 Rayl, e a temperatura no ato do procedimento, deve ser em torno de 22 ± 5 °C, para serem válidos pela norma ASTM C 522 (2009).

Figura 15: Esquema ilustrativo do aparato de Resistividade ao fluxo, segundo a Norma.



Fonte: Adaptado, Norma ASTM C 522, 2009.

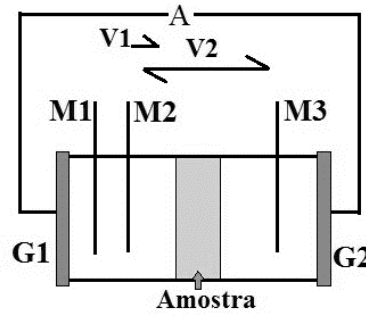
4.2.12 Tortuosidade α_∞

A tortuosidade α_∞ é caracterizada pela influência da geométrica da estrutura interna do material, não sendo influenciada pelo fluido passante por ela. Segundo Biot (1955); a tortuosidade é dita pela razão da energia cinemática da velocidade microscópica molecular V de um fluido viscoso pela energia cinética de ondas macroscópicas $\bar{V}$, sendo calculada em:

$$\alpha_\infty = \frac{V^2}{\bar{V}^2} \quad (51)$$

A tortuosidade α_∞ de um material amostral definida por Lauriks e *et al.*, (1994) é determinada através de um experimento, em que uma amostra fibrosa ou porosa dentro de um tubo de PVC passará por uma condutividade elétrica em meio fluido.

Figura 16: Desenho esquemático da bancada de medição de tortuosidade.



Fonte: A autora, 2018.

Sendo o seu valor calculado através da equação (52).

$$\alpha_\infty = \Omega \frac{\sigma_a}{\sigma_l} \quad (52)$$

Em que Ω é a porosidade do material; σ_a é a resistividade da amostra; e σ_l é a resistividade do líquido. Recalculando, a equação fica:

$$\alpha_\infty = \Omega \left(\frac{V_2}{V_1} \frac{d_1 - d_2}{d_l} - \frac{d_2 - d_3}{d_l} \right) \quad (53)$$

Em que V_1 é a potência do cabo elétrico 1 que passa do eletrodo M1 até M3; V_2 é a potência dos cabos elétricos 2 que passam do eletrodo M2 e M3; V_1 e V_2 fornecem as variações

de potência; d_1 é a distância entre os eletrodos M1 e M2; d_2 é a distância entre os eletrodos M2 e M3; d_3 é a distância entre M3 e M1. Os eletrodos M1, M2 e M3 estão localizados na parte anterior e posterior da amostra; G1 e G2 são eletrodos cilíndricos em forma de chapa, localizados nas extremidades do cano de PVC.

4.2.13 Porosidade Ω

A porosidade Ω determina a quantidade de poros existentes em um material poroso ou fibroso. Um material com porosidade alta, para a acústica, é considerado como um ótimo absorvente sonoro, pois toda energia sonora que por ele é captada, e, conseqüentemente, é absorvida e transformada em calor. O que caracteriza a porosidade de um material voltado para acústica é a qualidade de seus poros, que devem ser abertos e conectados entres si. Com análise microscópica, é possível analisar os poros de uma amostra e medir dados de porosidade; materiais de poros fechados são descartados para absorção sonora.

$$\Omega = \frac{Va}{Vt} \quad (54)$$

Em que Va é o volume de ar dentro dos poros de um material e Vt é o volume total de um corpo amostral. Beranek (1942) calculou o volume de ar dentro de um corpo de prova como:

$$Vt = S\Delta x \quad (55)$$

$$Vm = S_2\Delta x_2 \quad (56)$$

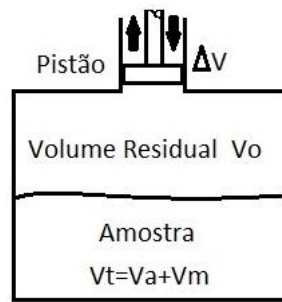
$$Va = Vt - Vm = \Delta x_1 S + \Delta x_2 S_1 \quad (57)$$

$$\Omega = \frac{Va}{Vt} = \frac{S\Delta x_1 + S_1\Delta x_2}{S\Delta x} = 1 - \frac{\Delta x_2}{\Delta x} \frac{1}{1 + \left(\frac{S_1}{S_2}\right)} \quad (58)$$

Considerando S_1 e S_2 como as faces das áreas dos materiais; Δx o volume inicial da amostra; $S\Delta x$ a soma do volume de ar; X_1 como o volume de massa da amostra X_2 ; $\bar{\rho}$ é a densidade média do volume de ar; V_m é o volume apenas da massa X_2 . Beranek considerou a lei dos gases ideais como base da sua equação de porosidade.

Champoux *et al.* (1991) construíram um aparato para medição de porosidade de materiais porosos e fibrosos. A equação elaborada por Champoux *et al.* para aquisição da porosidade também tem como princípio a equação da lei dos gases ideais. Nesse caso, a temperatura é considerada constante, por se tratar de um meio que se comporta como isotérmico.

Figura 17: Aparato ou câmara de medição de porosidade de Champoux *et al.*



Fonte: Adaptado em Champoux *et al.*, 1991.

O aparato usado por Champoux *et al.* (1991) não faz o uso de água e tem base no trabalho de Beranek (1942). Consiste em modelo mais simples, em que uma amostra porosa de volume total V_t (material e ar) é composto por um volume de material V_m e de um volume de ar na amostra V_a (somente o ar da amostra). A amostra é colocada dentro da câmara ou aparato de porosidade e, então, o volume residual V_o é conhecido; o volume da câmara ΔV é causado pelo movimento do pistão, resultando na mudança da pressão interna $\Delta P'$ que será medida. Com isso, a relação entre V_a e V_t se caracterizará como o resultado da porosidade. E a porosidade Ω é calculada pela equação (58). Entretanto, considerando o meio isotérmico e outros fatores, a equação (58) obteve algumas modificações, em que o volume total de ar V' medido na câmara é a soma do volume residual V_o com o volume de ar V_a nos poros da amostra.

$$V' = V_o + V_a \quad (59)$$

O modelo de Champoux *et al.* teve como a pressão inicial a atmosférica P_o , sendo o ΔV o aumento do volume causado pelo movimento do pistão. Com isso, há uma mudança de

pressão que será $\Delta P'$, atendendo a uma expansão isotérmica de um gás ideal no aparato, de um V'' volume total de ar denominado como volume aparente, sendo V'' medido na câmara ou aparato com mudança de pressão.

$$P_o * V'' = (P_o + \Delta P') * (V'' + \Delta V) \quad (60)$$

A mudança de pressão interna $\Delta P'$, conhecendo o valor de P_o e ΔV , mostra o volume aparente do volume total de ar V'' , usando a seguinte equação.

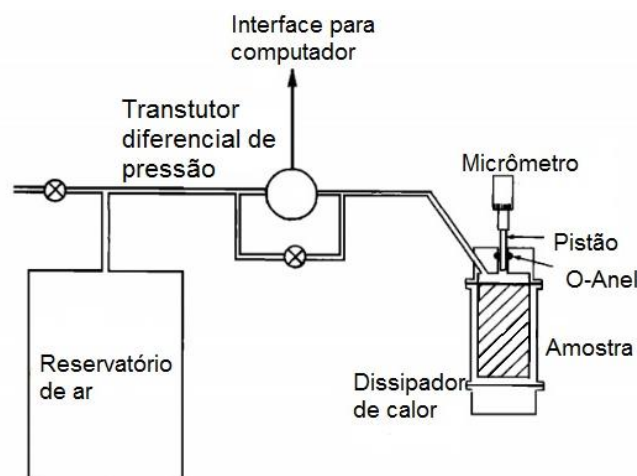
$$V'' = -[(P_o + \Delta P')/\Delta P'] * \Delta V \quad (61)$$

Logo, tem-se o volume contido dentro da amostra V_a , tal como:

$$V_a = V' - V_o \quad (62)$$

Este sistema de medição não faz uso de água e nem de um transdutor de pressão; porém, o aparelho se vale de um reservatório de ar, utilizando um princípio pelo qual a porosidade é medida pela mudança de pressão através de um manômetro conectado ao aparato lacrado. Através do movimento do pistão, a informação da pressão é ilustrada no transdutor de pressão, em um determinado tempo, caso a temperatura interna do aparato se apresente como isotérmica.

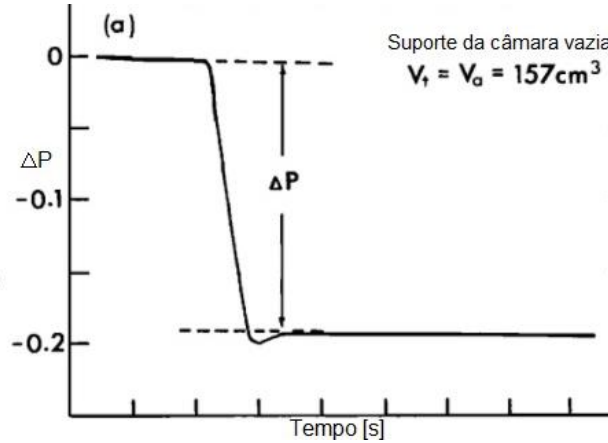
Figura 18: Sistema de medição de porosidade por Champoux *et al.*



Fonte: Adaptado, Champoux *et al.*, 1991.

O valor assintótico mostrado no transdutor de diferencial de pressão deve apresentar esse comportamento. Este sistema deve ser calibrado para iniciar o experimento.

Figura 19: Gráfico assintótico da câmara vazia de porosidade com volume de 157 cm³ de Champoux *et al.*



Fonte: Adaptando de Champoux *et al.*, 1991.

4.2.14 Impedância

A impedância acústica específica no ar $\tilde{Z}$ de um material é dada pela razão entre a pressão acústica no meio e a velocidade da partícula. Esta propriedade depende do meio e do tipo de onda incidente no corpo amostral, tal como a equação (39).

Delany & Bazley (1970) obtiveram duas quantidades complexas para propagação sonora dos materiais porosos e fibrosos, conforme a equação de impedância característica Z_c e o coeficiente de propagação ou o número de onda complexo k_c , calculados respectivamente em:

$$Z_c = R + iX \quad (63)$$

$$k_c = \alpha + i\beta \quad (64)$$

Sendo α a atenuação (parte real) e β a constante de fase (parte imaginária). As equações foram desenvolvidas a partir de resultados de medições de amostras de fibras minerais e com diferentes tipos de espessuras. Estas foram realizadas em bancada de resistividade ao fluxo σ e a impedância acústica Z . Os ensaios no tubo de Impedância garantiram dados da incidência normal, enquanto que os ensaios do tubo de Resistividade ao Fluxo contribuíram para diferença das pressões estáticas entre as faces das amostras.

Aplicados os resultados dos experimentos nas equações de impedância característica Z_c e no número de onda complexo k_c , tem-se a parte real e imaginária que podem ser expressas em função de $\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-a}$. Em que $a > 0$, sendo o expoente a uma constante diferente para as partes imaginária e real da Z_c e k_c , em que a impedância característica e o número de onda característico são dados pelas seguintes expressões, respectivamente:

$$\frac{Z_c}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.0511 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.75} - i0.07688 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.73} \quad (65)$$

$$\frac{k_c}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.0858 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.59} - i0.1749 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.70} \quad (66)$$

Sendo ρ_0 a densidade característica no ar igual a 1.21[kg/m³]; c_0 é a velocidade do som igual a 343 [m/s] (à 20[C°]).

As frequências calculadas devem ficar nas faixas de $0.01 \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1.00$ e, acima desse valor, não é recomendável a exposição humana. Os valores de Z_c e k_c serão empregados na equação de impedância Z_c de (65), em que Z_s é a impedância de superfície, i o número imaginário $i=\sqrt{-1}$, l a espessura da amostra.

$$Z_s = Z_c \cdot \coth(ik_c \cdot l) \quad (67)$$

Em seguida, usam-se os valores de Z_c e K_c no coeficiente de absorção da energia incidente normal α_n , que é dado por:

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{Z_c - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (68)$$

4.2.15 Coeficiente de absorção em materiais fibrosos de paredes rígidas

Allard & Champoux (1991) mencionaram em seu trabalho as dificuldades de usar o método equacional de Delany & Bazley (1970) em baixa frequência, otimizando-o para ser usado em materiais fibrosos. Foi encontrada uma nova equação a partir da geometria do

material, com base em representação física dos fenômenos acústicos associados com as diferentes propriedades físicas de materiais porosos, gerando resultados semelhantes nos intervalos de validade das equações de Delany & Bazley.

Para iniciar a equação, de Allard & Champoux usaram um modelo que não necessitaria de derivação, permitindo o uso de um modelo mais direto através de duas variáveis $G1$ e $G2$. Tais como:

$$G1\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right) = \left[1 + i\pi\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)\right]^{1/2} \quad (69)$$

$$G2\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right) = G1\left[\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right) 4N_{Pr}\right] \quad (70)$$

Considerando ρ_o a densidade do ar, N_{Pr} o número de Prandtl, f a frequência e σ a resistividade ao fluxo, a densidade dinâmica é calculada considerando a força de viscosidade inercial por unidade de volume de ar em um material, sendo dado por:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 + \frac{1}{i2\pi} \left(\frac{\sigma}{\rho_0 f}\right) G1\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)\right] \quad (71)$$

Em que a dependência do tempo é dada em $e^{i\omega t}$, sendo, $i = \sqrt{-1}$, e ω a frequência angular ($\omega = 2\pi f$). O módulo de *bulk* ou *bulk modulus* é dado por:

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left(\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + \left(\frac{1}{i8\pi N_{pr}}\right) \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-1} G2\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)} \right)^{-1} \quad (72)$$

Sendo γ como o calor específico, P_o a pressão de equilíbrio no ar, f a frequência expressa em Hz e σ em [Pa.s/m²].

Usando a impedância característica $Z_c = \sqrt{\rho(\omega)K(\omega)}$ e o número de onda característico $k_c = i2\pi f\sqrt{Z_c}$, a impedância da superfície Z_s pode ser calculada usando a variável l como espessura de uma amostra, podendo ser calculada pela equação (73):

$$Z_s = Z_c(\omega) \coth k_c(\omega) l \quad (73)$$

O coeficiente de absorção de energia incidente-normal α é derivado da impedância de superfície, dado como:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_c - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (74)$$

As equações de (69) até (74) são utilizadas para caracterização de lã de vidro e lã de rocha com espessuras finas.

Em caso de materiais fibrosos e com poros de parede rígidas e saturados em ar, a densidade de frequência dependente e o módulo de *bulk* foram trabalhados usando dois comprimentos característicos diferentes, como Λ e Λ' . Porém, para levar em conta o acoplamento de ar viscoso e inercial dentro de uma estrutura rígida porosa, o equilíbrio da densidade de ar ρ_0 pode ser substituída pela densidade dinâmica $\rho(\omega)$, sendo dependente da frequência.

$$\rho(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty \left[1 + \frac{\sigma \Omega}{i \alpha_\infty \rho_0 \omega} \left(1 + \frac{4 i \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \Omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (75)$$

Sendo que η é a viscosidade do ar; Ω , a porosidade; ω , a frequência angular; Λ , comprimento característico e α_∞ , a tortuosidade. O qual relaciona a densidade dinâmica $\rho(\omega)$ com a densidade do ar ρ_0 e a tortuosidade Tal como:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \rho(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty \quad (76)$$

Em caso de poros cilíndrico que formam um ângulo θ com a direção da propagação, a tortuosidade α_∞ será dada como (77); contudo, considerando α_∞ como o fator da forma estrutural de k_s , sendo igual a:

$$\alpha_\infty = k_s = 1/\cos^2\theta \quad (77)$$

Considerando que α_∞ avalia a resistividade dos poros de um material em uma medição em um determinado fluido saturado condutor. O comprimento característico Λ de Johnson *et al.* (1987) é um parâmetro que depende somente da geometria interna do material, igual a:

$$\Lambda = \frac{\int 2 |v(r)|^2 dV}{\int \Lambda |v(r_\omega)|^2 d\Lambda} \quad (78)$$

Em que a $v(r)$ é a velocidade de um fluido invíscido dentro do poro e $v(\omega)$ é a velocidade de um fluido invíscido na superfície da parede dos poros. Considerando Λ como:

$$\Lambda = s \left(\frac{8\eta\alpha_\infty}{\sigma\Omega} \right)^{1/2} \quad (79)$$

Nesta dissertação, o comprimento característico Λ não foi medido, pois as propriedades dos experimentos de porosidade e tortuosidade, que envolvem Λ , não puderam ser feitas nas amostras de fibras naturais. Ambos os experimentos não chegaram a resultados, pois a tortuosidade causou deformações nas amostras de fibras naturais e a porosidade não pode ser feita por falhas sistemáticas dos equipamentos. O método de função de transferência H_{12} , normatizado pela ASTM E 1050-10 é equacionado através do tubo de impedância, tal como no capítulo 6; nesse caso, o objetivo é levantar dados de uma amostra para equacionar o coeficiente de absorção α .

CAPÍTULO 5

TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste capítulo, são apresentados métodos experimentais de fabricação de amostras que foram executados nos laboratórios de dinâmica e mecanismo do curso de Pós-graduação da Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Os métodos têm como objetivo a fabricação de amostras das fibras mencionadas no Cap. III, para posteriormente obter as propriedades acústica do material através métodos experimentais e aquisição das predições do coeficiente de absorção das equações clássicas, com isso alcançar resultados do coeficiente de absorção sonora α . As amostras produzidas manualmente em laboratório foram calculadas para ter espessuras e diâmetros diferentes, para com isso analisar e entender se essas características comprometem os resultados dos experimentos.

5.1 AMOSTRAS DE FIBRAS NATURAIS

O estudo das fibras naturais, tem como princípio, a aplicação desse material como absorvedor acústicos, visando um produto ecológico e economicamente viável para investidores que buscam um material biodegradável. O Brasil é um dos maiores produtores, exportadores e consumidores de coco, sisal e cana-de-açúcar do mundo, gerando, em seu mercado interno, excedentes residuais proporcionais a suas próprias produções de consumo. Uma das alternativas para o uso desse resíduo é a aplicação na confecção de amostras para testes de caracterização acústica. Para preparação das amostras deve-se ter os seguintes equipamentos e aglutinante:

1. Balança digital;
2. Cola PVA (branca);
3. Moldes;
4. Estufa à 43°C;
5. Paquímetro com precisão centesimal.

5.1.1 Balança digital

Antes da pesagem da massa de fibra e cola é necessário que a balança esteja devidamente calibrada, para se evitar erros sistemáticos, também deve-se saber as proporções que devem ser pesadas para garantir uma mistura equilibrada das amostras. A confecção do corpo amostral seguiu uma tabela de proporções ideais de fibras e cola, onde foram calculadas as quantidades ideais de fibra para quantidade de cola, sendo 84% de fibra para 16% de cola, levando em conta o diâmetro da amostra, Tabela 5. Essas quantidades são importantes para certificar-se que as amostras não apresentem um declínio no seu desempenho como dissipador de ondas acústicas por conta dos seus excessos de fibra ou cola.

Tabela 5: Tabela de proporção de fibra e cola.

FIBRAS	5mm		
	Fibra [g]	Cola [g]	Diâmetro Ø [mm]
COCO/CANA/ SISAL	2,5	2,1	62,0
	3,2	2,7	71,5
	4,0	3,4	80,0
	5,1	4,3	89,5
	6,32	5,37	100,0

Fonte: A autora, 2018.

Abalança certificada deve possuir uma calibração atualizada, ou seja, dentro do prazo de validação, isso evita que a massa do material não seja adulterada, prevenindo possíveis erros de dosagem de fibra e cola. No experimento, a balança utilizada apresentava 0,01 g de escala de fundo.

Figura 20: Balança digital de precisão centesimal da marca GELAKA BK 4000.



Fonte: A autora, 2018.

5.1.2 Cola

Para que as mostras apresentassem um aspecto mais estruturado, evitando-se a perda de fibras no pós-produção de cada amostra, fez-se necessário o uso de um aglutinante para unir as fibras, e com isso deixar a amostra rígida o suficiente para não se desfazer no porta amostra e nem no ato da desenformar. É importante manter as fibras “unidas” na amostra, de maneira a não perder a sua propriedade porosa ao serem medidas, para isso, o aglutinante utilizado foi escolhido para atender os seguintes critérios: ser solúvel em água, ter alto desempenho, não tampar as cavidades e poros e ter um tempo de cura favorável. A Cascola do tipo Cascorez é uma cola à base de PVA que foi utilizada para a produção das amostras, e uma das principais característica desse material é o seu tempo de cura varia em relação a temperatura, tal como a Tabela 06.

Tabela 6: Tempo de cura da cola Cascola usada como aglutinante da fabricação das amostras.

	PRENSA QUENTE	PRENSA FRIA
Temperatura	Entre 60 °C e 90 °C	Acima de 12 °C
Período	3 a 5 minutos	Superior a 3 horas
Tempo de Cura	Mínimo de 12 horas	Mínimo de 24 horas

Fonte: Henkel Ltda, Cascola Cascorez extra adesivo PVA, 2017.

Após medir a cola na balança com as proporções ideais de fibra e com o diâmetro correspondente, tab.5, segue-se a etapa de mistura (cola + fibra), sendo um processo realizado de maneira ágio, para não ter perda do aglutinante. A cola, nesse experimento, passou por dois processos de cura com as fibras, sendo a mistura em prensa quente e em prensa fria até obter o formato e o diâmetro desejado. Dependendo da fibra, o tempo de cura variou em mais ou menos 24 horas.

Em caso de sinistro com misturas efetuadas com a cola, o fornecedor da cola Cascorez afirma que a mesma não é nociva, seguindo a norma ABNT NBR 14725-2. Para FISPQ (Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos), o produto é avaliado como não inflamável, mas poderá sofrer decomposição a altas temperaturas, passando a liberar gases cujas composições dependerão da superfície de contato onde o produto foi utilizado. Na tentativa de apagar a queima do produto, todos os tipos de extintores poderão ser utilizados e devem ser selecionados em função de outros materiais presentes na combustão. Os gases, fumaça ou vapores liberados após a queima do produto não devem ser inalados e, em casos de vazamento, o produto deverá ser estancado e deve-se evitar que o material ou água de lavagem atinja cursos

de água, rios e esgoto. Ao ser liberado na natureza, o produto pode causar danos, pois trata-se de um produto não biodegradável; por isso, não deve ser descartado no meio ambiente ou em cursos de água. Para eliminar/descartar o produto, o mesmo deverá ser incinerado.

Foi testado outro tipo de cola, a Pritt cola lavável Tenaz; é uma cola biodegradável e menos prejudicial ao meio ambiente, entretanto o seu desempenho como aglutinante não alcançou o objetivo, pois não permitiu que a amostra permanecesse por muito tempo no formato desejável para as medições e, além disso, essa cola é mais tolerante a umidade do ar. A Figura 21, ilustra a cola adesiva PVA Cascorez, usada como aglutinante para a fabricação das amostras; ao lado direito, outro aglutinante, Cola Tenaz biodegradável que apresenta baixo desempenho.

Figura 21: Cola adesiva PVA Cascorez, alto desempenho e a cola Tenaz biodegradável, baixo desempenho.



Fonte: A autora, 2018.

5.1.3 Moldes

Os moldes permitem com que as misturas de fibra e cola formam a amostra no formato cilíndrico com diâmetro e espessura de acordo como o molde estabelecido. Foram escolhidos moldes cilíndricos de acrílicos e liga metálica, com alturas internas de 5, 10 e 15 mm e diâmetro de 62,0, 71,5, 80,0, 89,5 e 100 mm e tampas de liga metálica (latão). A escolha do diâmetro foi para adequar as amostras aos tubos das bancadas de Resistividade ao fluxo e Impedância acústica, que, conseqüentemente, são diâmetro de tubulações disponíveis no mercado. Os moldes foram projetados e fabricados por alunos de Engenharia Mecânica nos laboratórios de Eng. Mecânica da PUC-PR.

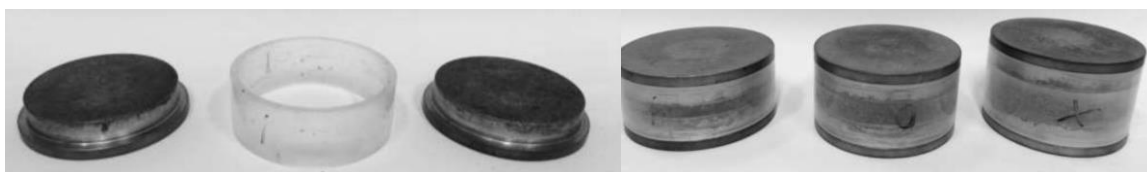
Tabela 7: Molde das amostras feitas em laboratório com respectivos diâmetros para altura interna de 5 mm.

MOLDE	DIÂMENTRO [mm]
1	62,0
2	71,5
3	80,0
4	89,5
5	100,0

Fonte: A autora, 2018.

De acordo com as quantidades da Tab. 5, de fibra e cola, as mesmas foram misturadas e com isso depositadas dentro do molde que corresponde as medidas estabelecidas, nele a mistura permaneceram por aproximadamente 24 horas para que alcancem o formato cilíndrico e iniciar a primeira etapa de cura. Esse tempo de modelagem ou de prensa fria variou de acordo com o tipo de fibra, pois as fibras consideradas mais secas, como as de cana-de-açúcar, tenderam a ficar prontas mais rapidamente que as fibras de coco e sisal.

Figura 22: Exemplo de Molde de amostra de fibra, tampa em liga metálica (Latão) e cilindro de acrílico.



Fonte: Grossl, 2016.

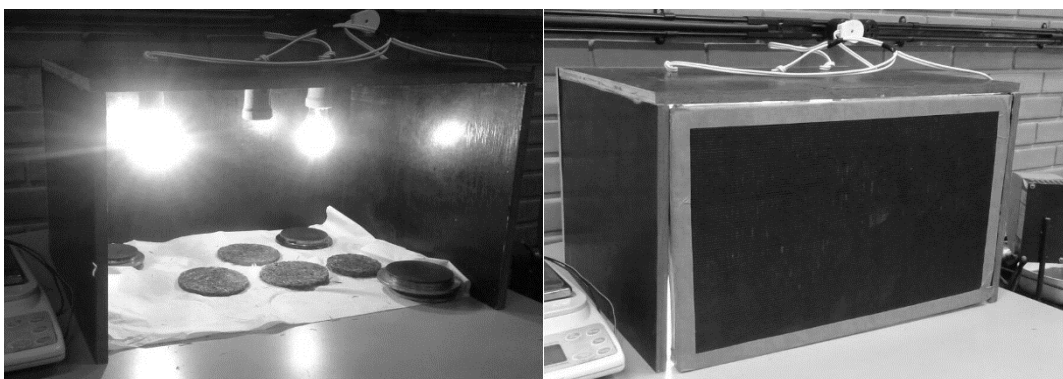
Adversidade de execução com os moldes

A matéria prima dos moldes, em contato com a mistura de fibra e cola por longos períodos, propiciou a oxidação da superfície da tampa, o que era comum acontecer preferencialmente com as fibras de coco e cana-de-açúcar, pois as mesmas liberavam substâncias que, em contato com a cola, provocavam a corrosão na superfície da tampa. Para que as tampas pudessem voltar a ter uma superfície lisa, as mesmas passavam por um processo de leve lixamento em sua superfície, ajudando no retardo do processo de oxidação das tampas dos moldes.

5.1.4 Estufa à 45°C.

Ao finalizar o primeiro tempo de prensa dentro dos moldes (prensa fria), as amostras passam a ser colocadas em uma estufa e nesta permanecem por volta de 5 à 12 horas, sendo a segunda etapa do tempo de cura para acelerar o processo; porém, foi observado que a umidade é um fator de maior relevância para a qualidade das amostras, pois, em dias de umidade acima de 50%, o tempo de cura se torna mais longo dentro da estufa, Figura 23. O tempo de estufa para cada tipo de fibra muda decorrente das suas propriedades intrínsecas; por exemplo, as fibras de cana-de-açúcar tendem a curar em um intervalo de tempo menor que as demais fibras. Observou-se também que, quanto maior a espessura, maior o tempo de cura e maior a probabilidade de estofamento das amostras dentro da estufa, como por exemplo, as amostras de fibra de coco que são as mais propensas a inchar. Para evitar esse estofamento da amostra dentro da estufa, pesos de até 500g foram colocados sobre as amostras.

Figura 23: Estufa para acelerar o tempo de cura das amostras.



Fonte: A autora, 2018.

O que permitiu a alta temperatura da estufa foi a iluminação de lâmpadas alógenas, que fizeram a temperatura interna da estufa chegar a 45° Célsius com a quantidade de três unidades de lâmpadas. Isso acelerou o modelamento e o endurecimento da amostra ao permanecer de forma prensada (prensa quente); porém, isso não evitou o estofamento da fibra.

5.1.5 Paquímetro

As amostras, após o tempo de cura dentro da estufa, foram ser medidas com o paquímetro para se ter o controle da espessura e diâmetro, pois amostras que deformassem ou saíssem das proporções de modelagem dos moldes eram descartadas. A medição com paquímetro foi feita em quatro pontos da amostra para ratificar a espessura e em dois pontos

para ratificar o diâmetro; geralmente a espessura era a mais inconstante, devido ao fenômeno do estofamento da amostra. O paquímetro utilizado com escala absoluta do tipo *digit cal* da marca Tesa, com fundo de escala de 0,02 cm.

Figura 24: Paquímetro digital.



Fonte: A autora, 2018.

5.2 Procedimento e manipulação das amostras

Os procedimentos de manipulação das amostras de fibras naturais obedeceram às etapas seguintes, para não correr o risco de desperdício de materiais:

- Seleção de um tipo de Fibra (coco, sisal, cana-de-açúcar) para iniciar o processo de fabricação, pois as fibras não podem ser misturadas por serem avaliadas uma a uma;
- Cola PVA Cascorez como aglutinante, pois, sem a cola, a amostra não cria forma para ser usada nos experimentos;
- Balança calibrada para suportar até 500g de fibra e cola, conforme a Tabela 5;
- Moldes para modelagem das amostras e para a primeira etapa do processo de cura, (os moldes devem estar limpos, sem resíduo de outras fibras e sem oxidação);
- Peso em cima dos moldes para impedir o estofamento das amostras (que é frequente no ato do modelamento) e em cima das amostras, quando as mesmas se encontram dentro da estufa;

- f. Estufa, segunda etapa de cura, para acelerar o tempo de cura e eliminar a umidade da amostra.

O processo de fabricação Figura 25 é relativamente simples, devendo-se seguir todas as etapas anteriores para não ocorrer perda de material ou excesso. Esse cuidado, além de evitar o desperdício, otimiza tempo e reduz gastos. A produção da amostra inicia com a seleção da fibra que apenas precisa ser misturada com a cola de maneira ágil, nas medidas certas e colocada nos moldes para criar forma cilíndrica; em seguida, aguardar um período sob um peso de 10 kg, Tabela 08, para ser desenformada e transferida para a estufa.

Figura 25: Processo de fabricação da amostra que vai desde a seleção até os processos de modulação.



Fonte: A autora, 2018.

O critério para o formato cilíndrico das amostras vem da origem dos tubos cilíndricos que existem no mercado, pois todos os equipamentos de caracterização acústica utilizados foram feitos nos diâmetros de 62,0, 72,5, 80,0, 89,5 e 100 mm; logo, se fez necessário a produção dos moldes nesse formato.

O tempo de cura é dividido em duas etapas; a primeira ocorre quando a mistura é colocada no molde, prensa fria, e fica em um determinado período, ver Tabela 08; esse período é necessário para que a amostra crie o formato desejado. O segundo tempo de cura é quando a amostra é retirada do molde e colocada na estufa, prensa quente; o formato da amostra dependerá da fibra, pois a mesma sofre influenciada da temperatura e umidade.

Tabela 8: Tempo de cura ideal para fabricação de amostras dentro do molde e dentro da estufa.

FIBRA	MOLDE	ESTUFA
Coco	20 horas	10 horas
Sisal	15 horas	8 horas
Cana-de-açúcar	10 horas	5 horas

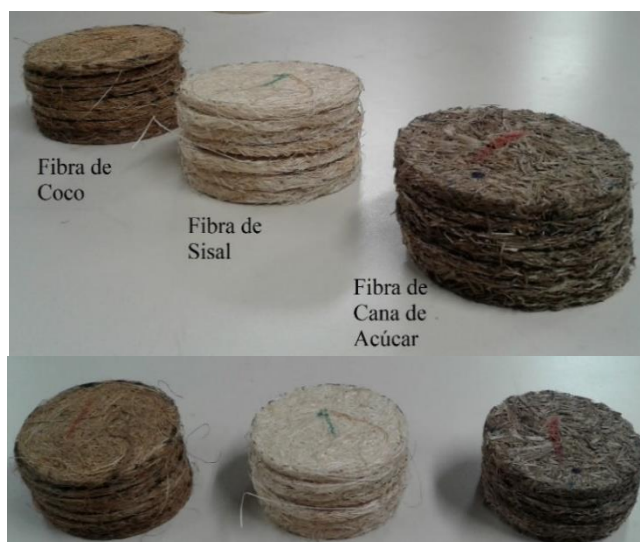
Fonte: A autora, 2018.

O formato das amostras de coco dependeu muito do longo tempo de cura em prensa fria e em prensa quente, pois as fibras tendiam a estufar mais quando misturada com o aglutinante e em contato com ambiente úmido. Além disso, a fibra de coco tendia a absorver, com maior frequência, a umidade do ar quando pronta. Logo, foi percebido que além das amostras de coco precisariam de mais tempo para curar, as amostras depois de pronta, e a fibra em si, teriam que ser armazenadas em ambientes secos, devido sua característica natural de liberar óleo para se hidratar e absorver a umidade.

As amostras de sisal demonstraram a necessidade de pouco tempo de cura, Tab. 8, e sua característica natural contribuiu para que as amostras não estufassem tanto quanto as de coco. Entretanto, a fibra de sisal, por ser seca e sem tratamento químico, tende também a absorver a umidade do ambiente, (AGEITEC, 2018), e, por isso, as amostras e a fibra de sisal devem ser armazenadas em ambientes seco.

As amostras de Cana-de-açúcar, tenderam a ressecar mais rápido no processo de cura e de mistura com aglutinante. Entretanto, as amostras ficaram concluídas em um período curto e estufaram menos que as outras fibras no processo de cura.

Figura 26: Amostras de fibras de coco, sisal e cana-de-açúcar, espessura de 5mm, feitas em laboratório.



Fonte: A autora, 2018.

Foram produzidas 273 unidades de amostras de fibra coco, sisal e cana, Tabela 9. O tempo longo de fabricação das amostras se deu por dois motivos, sendo o **primeiro** o comportamento diferente de cada fibra com o aglutinante (longo tempo de cura dentro dos moldes para as fibras de sisal e coco); e o **segundo** a quantidade mínima de moldes para

fabricação das amostras. As amostras de coco usadas nos experimentos foram feitas por Legat (2017), que utilizou as mesmas proporções de fibra para cola. As amostras de coco produzidas pela autora da dissertação não foram utilizadas, pois todas mudaram de espessura ao ficarem expostas a umidade e por pouco tempo na estufa, passando a ter características turgidas e com isso impróprias para os experimentos.

Tabela 9: Total de fibras produzidas.

FIBRAS	5mm	Excedentes	Impróprias	Total
Coco	0	0	60	60
Sisal	50	40	3	93
Cana-de-açúcar	50	40	30	120
TOTAL	100	80	93	273 Un.

Fonte: A autora, 2018.

CAPÍTULO 6

TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

A aquisição das propriedades acústica de materiais porosos e fibrosos vem sendo amplamente estudada desde o século XX por diversos pesquisadores, tendo como principal escopo a aplicação e utilização em absorção acústica. Inúmeros modelos matemáticos e experimentos podem avaliar a fibra natural e, com isso, julgar seus resultados como bons ou ruins à acústica. Este trabalho buscou avaliar amostras de fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar através de análises experimentais de Resistividade ao fluxo, Porosidade, Tortuosidade e Função de transferência usando tubo de Impedância para obter o coeficiente de absorção.

6.1 EXPERIMENTOS

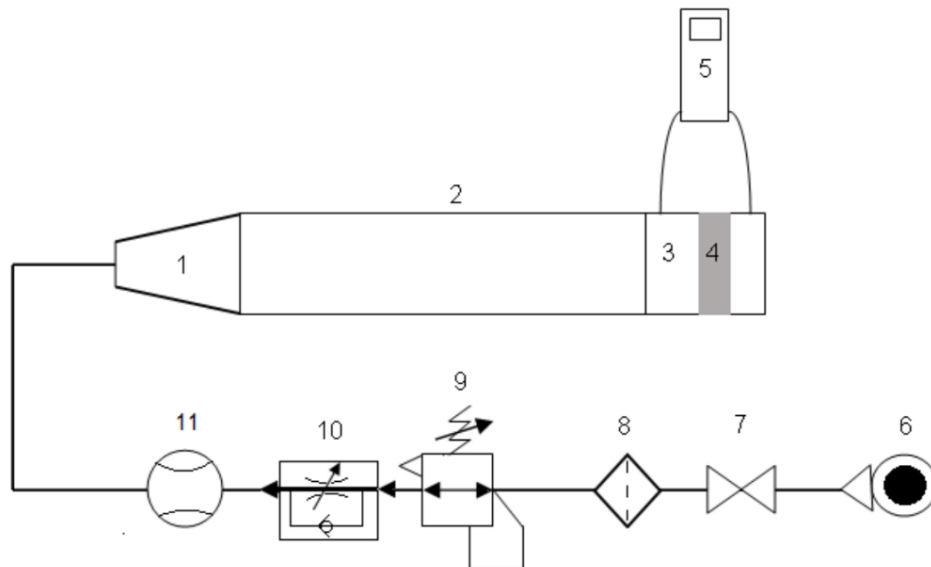
6.2 RESISTIVIDADE AO FLUXO (σ)

A resistividade ao fluxo σ é um experimento não acústico que afere uma amostra através de um sistema de componentes que permite dizer se o material tem resistência suficiente para dissipar a energia em seu interior. Com isso, fica relativamente mais fácil avaliar as propriedades do material e equacionar se este é adequado para absorver ondas sonoras dentro dos modelos matemáticos previstos por Allard & Champoux (1991).

O método experimental deve ser realizado em conformidade com a norma ASTM C522-03 que designa a medição de valores específicos da resistividade ao fluxo, em que os valores em Pa podem variar entre 100 à 10 000 [Pa.s/m]. A velocidade linear v permitida para que seja caracterizada a amostra pode ser modificada entre 5 a 50 mm/s, com incremento de 5 para assegurar um fluxo de ar linear. É orientado que a diferença de pressão que atravessa a amostra seja em um alcance de 0.1 a 210 Pa, para que não haja deformidade dos poros ou nas fibras no interior na amostra.

A experimentação de resistividade ao fluxo σ em amostras de fibras naturais foi desenvolvida no Laboratório de Dinâmica da PUCPR, em uma bancada construída por aluno de iniciação científica, Victor Pimentel Rosa, 2015. A construção da bancada seguiu rigorosamente os critérios da norma. A Figura 27 ilustra o esquema da bancada e a Figura 28 mostra a bancada que foi utilizada para o experimento.

Figura 27: Desenho esquemático da bancada de Resistividade ao Fluxo.



1- Luva de acoplamento e expansão (Nylon); 2- Tubo (Acrílico); 3- Luva de acoplamento (Nylon); 4- Suporte de amostra a ser medida; 5- Medidor diferencial de pressão; 6- Fonte de ar comprimido; 7- Válvula esfera; 8- Filtro de água; 9- Válvula reguladora; 10- Válvula reguladora de fluxo; 11- Medidor de fluxo.

Fonte: Pimentel, 2015.

Figura 28: Bancada de medição de Resistividade ao Fluxo.



Fonte: Victor Pimentel, 2015.

A Tabela 10 demonstra a especificação dos componentes que fazem parte da montagem da bancada de resistividade ao fluxo.

Tabela 10: Especificação dos componentes da bancada.

ITENS	DESCRIÇÃO	FABRICANTE
07	Rotômetros, modelo FL3139SANISTAIR com faixa de medição de 0 a 11,887 L/min de ar e o modelo FL3140SANISTAIR com faixa de medição de 0 a 29,364 L/min de ar.	OMEGA
05	Transdutor indicador de pressão diferencial, modelo 616WL-22 com faixa de medição de 0 a 60 Pa e o Modelo 475-000-FM serie 475 Mark III com faixa de medição de 0 a 250 Pa.	DWYER
09	Válvula reguladora de fluxo	PARKER
08	Válvula reguladora de pressão, modelo 27R112AD da série 27R com faixa de medição de 0 a 2 bar.	PARKER
10	Filtro de particulado e água, SERIE 6 – 1/2 com dreno manual e elemento filtrante de 40 micra	PARKER
01, 02 e 04	Tubos e conexões	PARKER
11	Fonte de alimentação Dual DC POWER SUPPLY 0-40V, 3ª/0-20V, .6ª	HEWLETT PACKARD

Fonte: A autora, 2018.

Para execução do experimento, foram utilizadas amostras com quatro tipos de diâmetros diferentes e, com isso, quatro bancadas distintas, respeitando essas medidas, seguindo os respectivos diâmetros Ø 62,0, Ø 71,5, Ø 80,0 e Ø 89,5 mm. Para eliminar falha nos resultados do experimento e garantir um escoamento de ar totalmente laminar, constante e desenvolvido no interior do tubo, foi necessário calcular o comprimento ideal do tubo em que passará o fluxo de ar, através da equação (80), conforme Fox *et al.*, (2006):

$$\frac{Le}{d} = 0,06 \cdot Re \quad (80)$$

Em que:

Le é o comprimento do tubo;

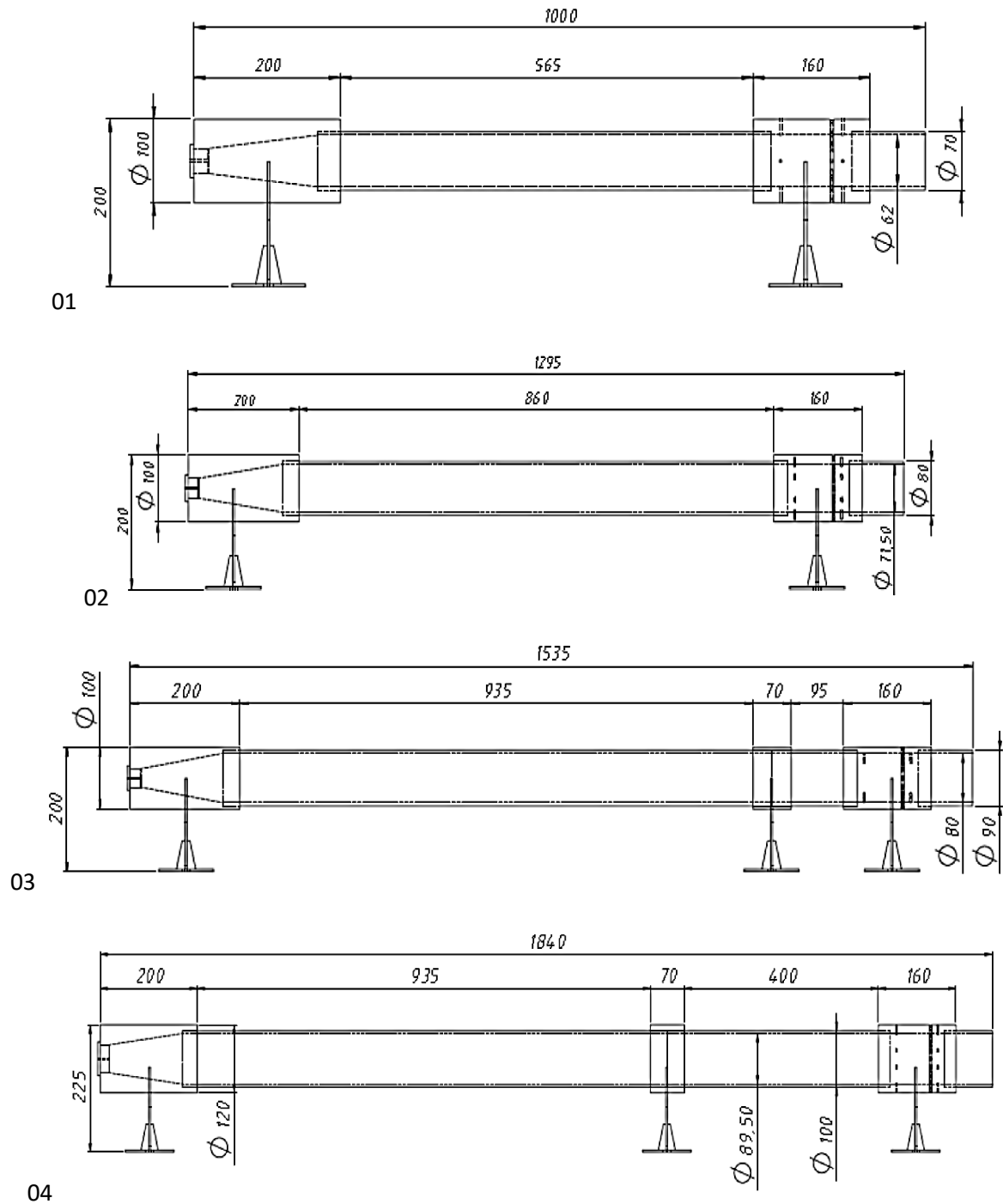
d é o diâmetro no interior do tubo em [mm];

Re é o número de Reynolds para a maior velocidade de escoamento;

As bancadas possuem as características das seguintes ilustrações, em que suas dimensões em [mm] e diâmetros são respectivamente diâmetro de Ø62 mm em 01; em 02 com

diâmetro de $\varnothing 71,5$ mm; em 03 com diâmetro de $\varnothing 80$ mm; em 04 com diâmetro de $\varnothing 89,5$, Figura 29, sendo o comprimento de cada tubo de cada bancada foi calculado conforme a equação (80), respeitando os diâmetros de tubulações existentes no mercado, o que influenciou diretamente no formato das amostras.

Figura 29: Esquema ilustrativo das quatro bancadas de resistividade ao fluxo.



Fonte: Pimentel, 2015.

Na bancada do tubo de diâmetro de 62 mm, foi calculado o comprimento do tubo de 771 mm; para o tubo de diâmetro 71,5 mm foi calculado um comprimento de 1039 mm; para o tubo de diâmetro de 80 mm, um comprimento de 1283 mm; e, para o tubo de diâmetro de 89,5 mm, um comprimento de 1624 mm. O procedimento foi conduzido da seguinte maneira:

- a. Fixação da amostra no suporte;
- b. Ajustar a válvula reguladora de pressão para 0,5 bar, com o objetivo de manter a pressão de ar comprimido da rede constante e proteger os rotâmetros e os manômetros diferenciais de pressão de uma sobrecarga;
- c. Atravessar a amostra com fluxo constante de ar com velocidade que varia de 5 à 50 mm/s e incremento de 5, sendo a velocidade regulada pelo rotâmetro;
- d. Ao controlar a velocidade no rotâmetro, a mesma será aumentada de forma alternada, indo da menor para maior;
- e. Medir a diferença de pressão da amostra quando o fluxo de ar passa antes e depois da amostra com o manômetro diferencial de pressão, respeitando as sequências das velocidades do item anterior;
- f. Os resultados de cada medição devem ser constantes nas faixas de velocidades estudadas para o material avaliado;
- g. O erro tolerável na avaliação de R poderá ser de até $\pm 5\%$. Para os instrumentos de manômetros utilizados, a incerteza de medição poderá alcançar até 2%;
- h. Repetir o procedimento para todas as amostras a serem medidas.

Foram selecionadas apenas as amostras das fibras naturais em questão, nas espessuras de 5mm e com os diâmetros citados; com isso, a resistividade ao fluxo σ foi calculada conforme a equação normatizada pela ASTM C 522-03, sendo a equação 50 igual a equação 81, tal como:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{v \cdot l} \quad (81)$$

Sendo ΔP a diferença de pressão da amostra ou a perda de carga, v a velocidade do fluxo de ar ao longo da amostra e l a espessura da amostra. Neste experimento, foi utilizado um total de 120 amostras de fibras naturais, em que, para cada tipo de fibra, 40 amostras nos diâmetros e espessuras citados anteriormente. Estas foram avaliadas em laboratório na bancada

de resistividade ao fluxo e obtiveram os seguintes resultados no apêndice A à F, que será melhor detalhado no capítulo 07.

6.3 POROSIDADE (Ω)

A porosidade Ω é uma propriedade não acústica de um material poroso-fibroso, em que a razão entre o volume de ar na amostra porosa-fibrosa pelo volume total da amostra irá definir o valor de porosidade. Esta característica é um parâmetro da teoria da propagação sonora dos materiais inicialmente conhecida por Beranek (1942) e, posteriormente, por outros autores que, através de modelos matemáticos e experimentos, buscam identificar em um material o maior índice de poros. Um material que apresenta alta porosidade torna-se um bom dissipativo de som, transformando ondas em calor, tal como as espumas de Poliuretano PU. Esta dissertação levou em consideração várias teorias de porosidade para objetivar o melhor método avaliativo gerador de resultado preciso e com menos flutuações.

Quando mensuradas e calculadas, a porosidade e outras características intrínsecas do material poroso/fibroso (resistividade ao fluxo, tortuosidade e impedância característica), se chegará a resultado de coeficiente de absorção. O cálculo do coeficiente de absorção com os dados de porosidade só será aceitável se a porosidade do material resultar em até 99%. Em valores de porosidade iguais a 100%, evidencia-se a falta de massa física e, também, não se pode afirmar se esse valor é útil ou não para acústica, pois a onda sofre várias perdas de energia durante o seu trajeto. Para materiais de poros fechados, a porosidade é igual a zero, pois não há circulação de ar nesses poros e, conseqüentemente, não haverá perda de carga; logo, são poros descartados das medições. Esta dissertação trabalhou de forma heurística de avaliação em três diferentes métodos de porosidade Ω , usando como base os métodos de Beranek (1942), Champoux & Allard (1991) e Gros & Panneton (2004).

6.3.1 Beranek – 1942

Leo Beranek foi um dos pioneiros sobre os estudos da porosidade de um material, o autor iniciou seus estudos em meados de 1942, de forma experimental e analítica. As formulações de porosidade Ω de Beranek servem até os dias de hoje para calcular Ω em diversos materiais. Com base nas equações de Beranek foi desenvolvido um experimento para medir a porosidade do material com o uso de água. O experimento foi realizado, no laboratório de

mecanismos da Pontifícia Universidade Católica, e a água foi o principal fator de avaliação de porosidade nas amostras. O ensaio incidiu na retirada de ar de dentro de uma amostra de espuma de polímero submersa em um recipiente com 650ml de água, de maneira que a remoção do ar na amostra acontecia na medida em que se pressionava a amostra com um bastão de PVC, sem obstruir a saída de ar do tubo. Por ser simples e prático, esse experimento com espuma não demandou muito tempo para ser realizado sendo rápido em comparação com outros métodos.

Figura 30: Medição de espuma de polímero no experimento de porosidade utilizando água.

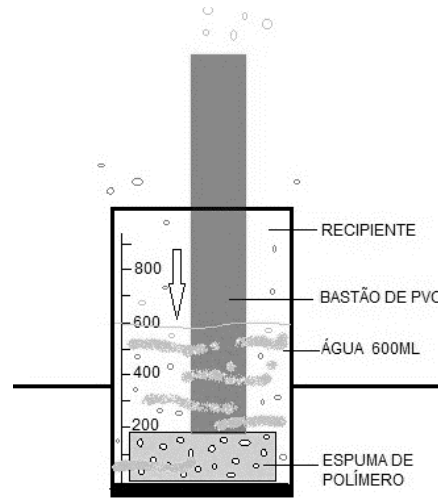


Fonte: A autora, 2018.

Neste modelo experimental, utilizou-se os seguintes equipamentos.

1. Estufa para garantir a amostra seca e sem umidade;
2. Balança de precisão com duas casas decimais;
3. Recipiente de 1 litro com medida escalar para líquido;
4. Espuma de polímero Rosa e Branca para avaliação das medições;
5. Bastão de PVC para pressionar as espumas na água;

Figura 31: Medição de espuma de polímero no experimento de porosidade utilizando água.



Fonte: A autora, 2018.

Para calcular a porosidade Ω , no método experimental com água, foi levado em consideração a densidade do ar como um fator determinante para aquisição do resultado, equação (85):

$$\Omega = \frac{V_a}{V_{am}} \quad (82)$$

$$\Omega = \frac{\frac{m_{ar}}{\rho_{ar}}}{\frac{m_f + m_a}{m_t}} \quad (83)$$

$$\Omega = \frac{\frac{m_a}{\rho_{ar}}}{V_t} \quad (84)$$

$$\Omega = \frac{V_a}{\rho_{ar} \cdot V_t} \quad (85)$$

Nessa equação, V_a é o volume de ar dentro dos poros da amostra, ρ_{ar} é a densidade do ar, V_{am} é o volume total da amostra, m_{ar} é a massa de ar, m_a é a massa da amostra e m_t massa total ($m_{ar} + m_a$). Nesse experimento, considerou-se outros fatores além das variáveis necessárias para calcular a porosidade, como, por exemplo, a pressão atmosférica (atm) relativa para calcular e a atm absoluta devido a mudança constante de temperatura e a umidade no local do experimento.

As medições foram realizadas com 10 espumas de polímero brancas e 10 espumas de polímero rosas, de espessura e diâmetro aproximados de 25 mm e 89,50 mm respectivamente, sendo que o objetivo inicial desta medição era avaliar o experimento em si e sua eficiência para medições futuras com fibras naturais de coco, sisal e cana-de-açúcar. As espumas analisadas se distinguiram pela sua densidade e espessura, sendo a espuma branca mais densa e com menor espessura do que a espuma rosa, Tabela 11.

Tabela 11: Características das espumas usadas inicialmente nas medições.

Características	Espuma Branca	Espuma Rosa
Densidade	37%	22%
Espessura (média das amostras)	24,11	28,83

Fonte: A autora, 2018.

Resultados e Implicações

As medições das espumas rosas apresentaram resultados menores que as amostras das espumas brancas, o que, teoricamente, seria inviável, pois a espuma branca se caracteriza por ser mais densa, o que a tornaria menos porosa que a espuma rosa. Esse resultado foi fundamental para descartar este experimento, visto que a espuma rosa deveria ser considerada mais porosa por ser menos densa que a espuma branca. Outro fator que pode justificar esse resultado é a alta e frequente variação dos resultados da amostra rosa, o que pode identificar uma concentração de poros fechados. A avaliação demonstrou nitidamente as variações dos resultados da espuma rosa, ao passo que a espuma branca apresenta um resultado mais linear.

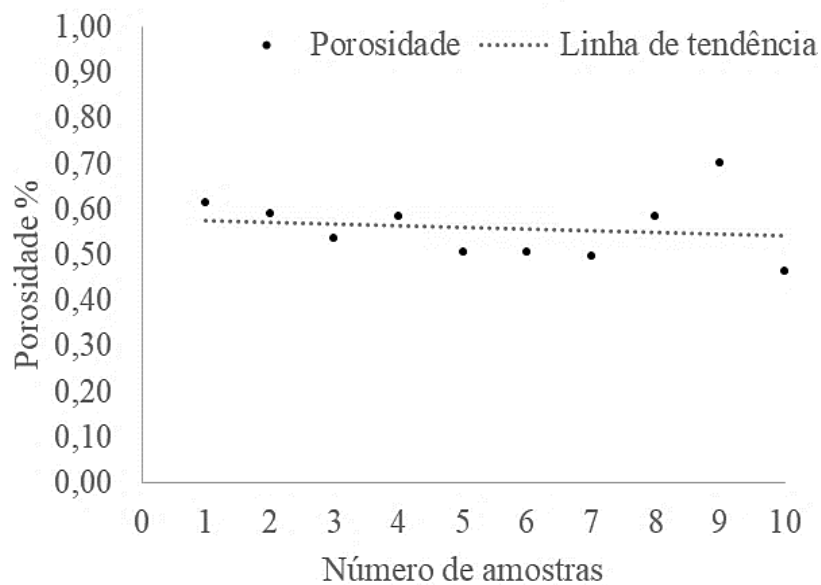
Figura 32: Amostras de espuma de polímero e as avaliações de suas porosidades.

	QTD	BRANCA	ROSA
	1	61%	42%
	2	59%	40%
	3	54%	62%
	4	59%	39%
	5	51%	36%
	6	50%	15%
	7	50%	109%
	8	59%	34%
	9	70%	94%
	10	46%	108%

Fonte: A autora, 2018.

As medições das espumas brancas demonstraram ser mais eficazes que as amostras de espuma rosa, no gráfico abaixo é possível verificar que a espuma branca apresentou baixa flutuações em seus resultados. Os dados das amostras de espuma rosa foram descartados por apresentarem altas flutuações em todas as amostras. Cada amostra, de ambas as espumas, foi medida mais de cinco vezes para alcançar a acurácia dos resultados.

Gráfico 1: Resultado das Medições de 10 espumas de polímero brancas utilizando água, variando entre 46% à 61%.



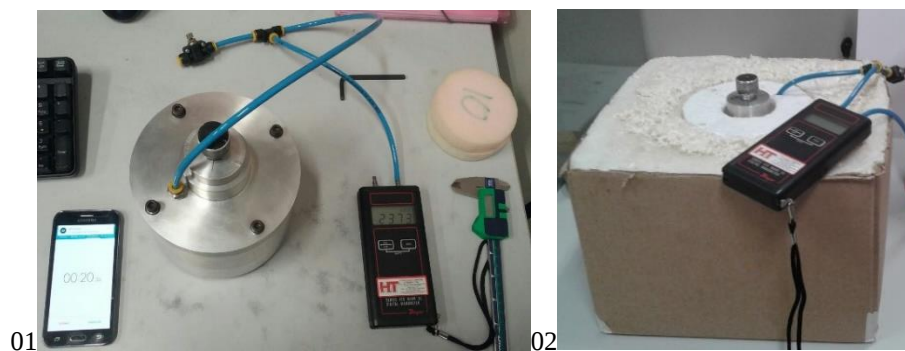
Fonte: O autor, 2018.

6.3.2 Allard e Champoux – 1991

Allard e Champoux trabalharam em dois artigos a respeito da porosidade; porém, neste trabalho foi descrito primeiramente do artigo Champoux *et al.* (1991) em que os autores descreveram essa propriedade acústica através de seu experimento no qual uma amostra permanece enclausurada dentro de um aparato de ar lacrado e o movimento do pistão proporciona a diferença de pressão. O aparato de porosidade foi projetado pelo aluno de iniciação científica Vinicius Antônio Grossl em 2016 no laboratório de mecanismos da Pontifícia Universidade Católica do Paraná e foi inspirado no modelo de Champoux (1991). O aparato confeccionado foi manuseado para o experimento; entretanto, no decorrer da experimentação, foram feitos alguns ajustes, objetivando o controle da temperatura. Por ser de alumínio o envoltório, foi usada uma manta de poliuretano (P.U.) expandido em seu entorno para o controle da temperatura.

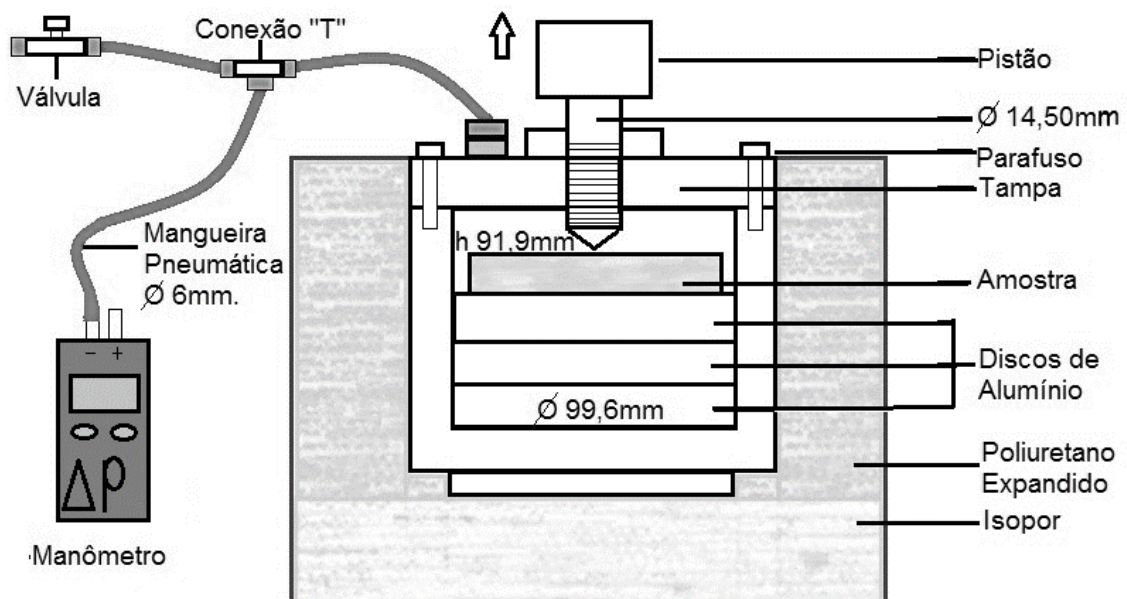
A câmara de medição possui formato cilíndrico com diâmetro interno de 99.6 mm, altura interna de 91.9 mm e espessura da parede de 25mm. O sistema que integra o aparato é feito de mangueiras pneumáticas de PU que conectam o aparato através da conexão “T”, ligando o manômetro diferencial de pressão, a câmara e a conexão válvula. A conexão válvula permite a entrada e saída de ar do aparato. Antes de iniciar o experimento, a conexão válvula deve ser totalmente fechada para o ar não saia. O pistão fica localizado na tampa da câmara, possuindo diâmetro de 14,50 mm e, quando rosqueado para cima, causa uma pressão negativa dentro da câmara que será ilustrada no *display* do manômetro, ou seja, o controle da pressão interna e externa do aparato é feita pelo o pistão, possibilitando o movimento de ar no interior do aparato. A Figura 33, demonstra em 01 a câmara de porosidade sem a proteção de PU e em 02 a câmara de porosidade com a proteção do PU expandido e a proteção de isopor.

Figura 33: Câmara de porosidade.



Fonte: A autora, 2017.

Figura 34: Esquema ilustrativo do sistema da câmara de porosidade de volume de 714,412mm³.



Fonte: A autora, 2017.

O sistema do aparato de porosidade é composto de:

- a. Uma câmara feita de alumínio com parede de 25mm;
- b. Tampa com 4 entradas de parafuso de 6mm de diâmetro e uma entrada de um pistão de diâmetro interno de 14,50mm e um 1/4" NPT passante;
- c. Quatro parafusos para assegurar que a câmara estará bem lacrada;
- d. Anel O-ring para garantir que o ar não escape;
- e. Três mangueiras pneumáticas de poliuretano de diâmetro interno de 4mm e externo de 6mm;
- f. Uma conexão "T" e uma conexão com válvula;
- g. Um manômetro diferencial de pressão digital com $\pm 0,5\%$ de escala de fundo em temperaturas de 15°C à 25°C e $\pm 0,1\%$ de escala de fundo em temperaturas de 0°C à 15°C;
- h. Quatro discos de alumínio de 22,21; 20; 20 e 10mm para calibração e medição de amostras;
- i. A câmara tem suas paredes protegidas com poliuretano expandido e isopor em sua base.

O procedimento consiste em fazer primeiramente a calibração com os três discos, conforme a orientação no item **Calibração**, e, após isso, a medição já pode ser feita, iniciando com a verificação das quantidades de discos conforme a espessura das amostras que serão medidas, como por exemplo:

- a. Quatro discos para medições com amostra de espessuras até 5mm;
- b. Três discos para medições de amostras de espessuras maiores de 10mm;
- c. Dois discos medições com amostras de espessuras maiores que 20mm.

As amostras devem ser colocadas dentro da câmara de maneira que não amassem e nem possibilitem espaços consideráveis entre amostra e a tampa na parte interna. Isso evita que haja flutuações na pressão. Ao fechar o aparato, deve-se verificar se a válvula "T" se encontra aberta para garantir a igualdade da pressão externa e interna dita no *display*. O procedimento deve seguir com o uso do paquímetro, marcando a altura inicial do deslocamento do pistão, que deve ser de aproximadamente 7,63mm da superfície da tampa. A porosidade é medida pela razão entre o ar dentro da amostra e o volume total da amostra, equação (82); porém, neste estudo, a equação foi modificada devido as adversidades do experimento na câmara.

Para calcular a porosidade, nesse método, deve-se ter o volume da fibra V_f , volume de ar dentro da amostra V_{ar} que é calculado conforme as equações (86) e (87), considerando V_{cam} é o volume da câmara, V_r é o volume residual, V_o é o volume inicial, V' volume aparente, V_t volume total.

$$V_f = V_{cam} + V_r - V_o \quad (86)$$

$$V_{ar} = V' - V_{cam} - V_r + V_t \quad (87)$$

O volume aparente V' e a porosidade Ω igual a respectivamente:

$$V' = - \frac{(P_o + \Delta P)\Delta V}{\Delta P} \quad (88)$$

$$\Omega = \frac{V_a}{V_t} \quad (89)$$

Calibração

Antes de dar início ao experimento, o sistema deve ser calibrado através de medições dos três discos rígidos de alumínio com diâmetro de 99,6mm e espessuras 20,21mm, 20,19mm e 22,21mm. Com o resultado da calibração, se calcula o volume residual V_o que é empregado na equação do volume de ar nas amostras V_a .

O procedimento da calibração é de simples manuseio, consistindo em fazer a medição na câmara somente com os discos rígidos nas seguintes sequências: 1º- disco 1; 2º- disco 1 e disco 2; 3º- disco 2 e disco 3; 4º- disco 1 e disco 3 e por último 4º- d1, d2 e d3, respeitando as faixas de pressão de -50 à -250 Pa. Os discos, além de servirem como porta-amostra, também servem para diminuir o volume de ar dentro câmara V_{cam} . Então, o volume aparente V' será calculado e, na sequência, o volume residual V_o .

$$V' = - \left(\frac{P_o + \Delta P}{\Delta P} \right) * V_p \quad (90)$$

Sendo que P_o é a pressão absoluta atmosférica, ΔP a variação de pressão com o movimento do pistão, V_p volume que o pistão irá causar após ser girado e V' é o volume de ar no entorno da amostra, nos poros da amostra e o volume de ar do pistão quando girar no sentido superior. O movimento do pistão deve ser cauteloso para que não haja grandes alterações no manômetro, pois a sensibilidade do equipamento capta todo e qualquer movimento, alterando os resultados.

Observou-se que, antes de calibrar o sistema da câmara de porosidade, é necessário tomar os seguintes cuidados:

- a. A câmara deve ficar completamente aberta e o pistão fora da tampa do aparato;
- b. A câmara deve ser fechada e parafusada de maneira que não haja fuga do ar e, após isso, colocar os discos destinados a calibração; em seguida, colocar o pistão;
- c. A altura do pistão deve ser inicialmente de 7,63mm e, em seguida, conectar e ligar o manômetro diferencial de pressão; após 1min, dar uma volta completa até o ponto de origem;
- d. Após a primeira volta do pistão, o mesmo deverá ser girado conforme a quantidade de discos que estão no interior da câmara, ou seja, quanto maior o número de discos, menor o intervalo de giros; por exemplo, para câmara vazia, o intervalo de um giro; para câmara com um disco, 1/2 giro; para câmara com dois discos, 1/3 de giro; e para câmara com três discos, 1/4 de giro.

Implicações

O experimento realizado com a câmara de porosidade não alcançou resultados eficientes, pois fatores de origem estrutural e grandezas físicas contribuíram para resultados errôneos. A câmara de ar feita de alumínio se destaca como um dos principais fatores de propagação de erro, pois o alumínio tem uma alta condutividade térmica com o meio, contribuindo para flutuações da pressão e temperatura. Outras mudanças foram realizadas objetivando resultados satisfatórios, desde a alteração das tubulações de PU, proteção do poliuretano na câmara, à mudança de método para desenvolver as medições; porém, o objetivo

não foi alcançado. O experimento foi abandonado por falhas sistemáticas conhecidas e desconhecidas, onde as aquisições dos dados passaram por variações discrepantes, gerando resultados espúrios e duvidosos que não poderiam ser levados em consideração para este estudo. Esse experimento irá passar por novo processo de avaliação, desde o material de que foi feita a câmara até os equipamentos utilizados para medir a pressão e temperatura, para ser estudado posteriormente e obter dados confiáveis.

6.3.3 Gros e Panneton - 2004

Uma outra possibilidade de fazer a medição de porosidade foi o uso de Câmara de Vácuo, seguindo os conceitos dos autores Panneton e Gros (2004), que obtiveram dados confiáveis através de um método no qual retirava o ar de dentro da amostra, pesando-a posteriormente e com resultado calcular a porosidade. Os autores utilizaram o princípio de Arquimedes no método de porosidade para medir a massa porosa aparente de ar e medir a massa sólida em vácuo, não assumindo condições isotérmicas para o experimento tal como o método em Champoux *et al.* (1991). Sendo a porosidade Ω medida no vácuo como:

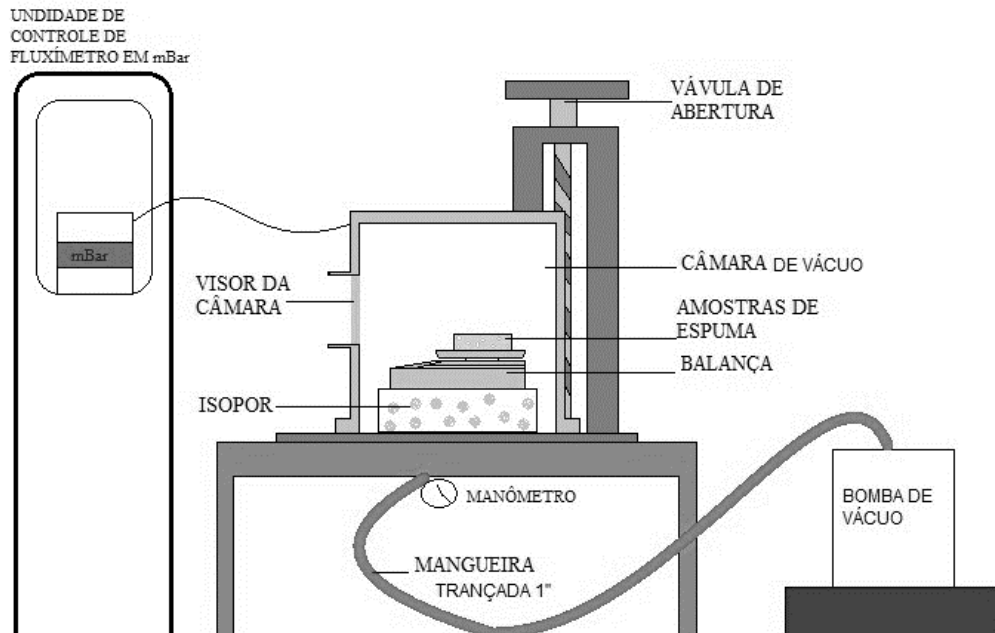
$$\Omega = 1 - \frac{M - M'}{\rho * V} \quad (91)$$

Sendo M a massa medida em vácuo, M' a massa aparente de ar na amostra, ρ a densidade da amostra e V o volume da amostra. O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Metrologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná na câmara construída pelo professor Cezar Neitzke, que disponibilizou a câmara de vácuo. A medição é simples e de fácil manuseio, necessitando dos seguintes equipamentos:

- a. Câmara de vácuo;
- b. Mangueira trançada 1”;
- c. Bomba de vácuo;
- d. Manômetro medidor de pressão;
- e. Unidade de controle de fluxímetro;
- f. Multímetro termopar;
- g. Balança de precisão, com três casas decimais;
- h. Amostras de espuma de polímero branca e rosa;

- i. Cronômetro para registrar o tempo de mudança do volume de ar dentro da amostra poroso;
- j. Lanterna para visualizar a balança através do visor da câmara.

Figura 35: Esquema ilustrativo da câmara de vácuo com amostra para medição de porosidade.



Fonte: A autora, 2018.

Para proceder o experimento, primeiramente foi necessário aquecer o motor, ligando-o meia hora antes de iniciar a sucção; nesse intervalo, a balança ficou posicionada em cima de uma barra de isopor na câmara para evitar vibrações oriundas da bomba de vácuo; em seguida, com a balança zerada, a amostra foi posicionada sobre a mesma e a câmara fechada através da válvula. Antes dos procedimentos da medição, a unidade de controle fluxímetro foi ligada para iniciar a medição e, posteriormente, ligado o cronômetro para marcar o tempo de decaimento de massa.

Figura 36: Medição teste na câmara de vácuo com amostra de espuma de polímero para medição de porosidade.



Fonte: Mansur, 2018.

Implicações

As medições que foram feitas não alcançaram os resultados, pois havia vários erros sistemáticos que demandariam tempo para serem resolvidos, tais como, a precisão da balança que saía da tara (a balança ficava dentro da câmara de vácuo) quando o vácuo estava acionado o motor causava vibração na câmara mesmo estando distante. Com isso, cada medição realizada com espuma sintética, não apresentava os mesmos resultados e nem dados aproximados quando processo era repetido.

6.4 TORTUOSIDADE α_∞

A Tortuosidade α_∞ é uma propriedade que depende apenas da geometria dos poros ou das fibras dentro do material. A onda de um fluido é predominantemente lenta dentro dos espaços entre fibras e poros, entretanto, com uma velocidade normalizada pelos espaços tortuosos. O resultando de tortuosidade deve ser em valor maior que 1, *Jhonson et al.*, (1982). A aquisição desta propriedade (uma propriedade não acústica) pode ser feita através de métodos experimentais, tal como fez Allard *et al.*, (1993) e Lauriks *et al.*, (1994). Este parâmetro é considerado importante para estudos de propagação sonora nos materiais porosos, pois com ele pode-se chegar número complexo de ondas e a impedância característica. O experimento consiste em uma condutividade elétrica que é transferida por um líquido viscoso que passa dentro de um material absorvente e, com isso, é feita uma avaliação da sinuosidade do esqueleto do material poroso e seus resultados. Juntamente com a porosidade Ω , calcula-se α_∞ , equação (92). O experimento foi realizado no laboratório de mecanismos da Pontifícia Universidade Católica, na bancada de tortuosidade que foi projetada pelo aluno Bruno Mattos em seu Trabalho Final de Graduação (2017).

$$\alpha_\infty = \Omega \left(\frac{R_s}{R_f} \right) \quad (92)$$

Em que R_s é a resistência do material saturado em líquido condutor e R_f é a resistividade do fluido. Para estas medições, foram utilizadas amostras de espuma de polímero branca e rosa em formatos cilíndricos, de 21,00mm de espessura, 71,50mm de diâmetro e densidade de 45,5 kg/m³ e 26,6 kg/m³, respectivamente, que são as mesmas amostras que foram utilizadas no experimento de porosidade na água. A solução saturada utilizada para fazer a transferência de corrente elétrica foi o CuSO₄_ Sulfato de cobre 0,1 mol/l. e, para o caso de a solução perder suas substâncias com a temperatura, outras substâncias saturadas foram disponibilizadas para excedentes, como: KCl_ Cloreto de potássio 0,15 mol/l, NaCl_ Cloreto de sódio 0,1mol/l. Com os dados de tortuosidade e porosidade é possível calcular a densidade dinâmica $\rho(\omega)$ e o modulo volumétrico ou *Bulk modulus* $K(\omega)$ para materiais fibrosos e porosos, e com isso encontrar o número de onda complexo k_c e a impedância característica Z_c . Considerando essas duas propriedades é possível calcular a impedância de superfície Z_s e, conseqüentemente, o coeficiente de absorção α de um material através das equações de Allard e Champoux (1991).

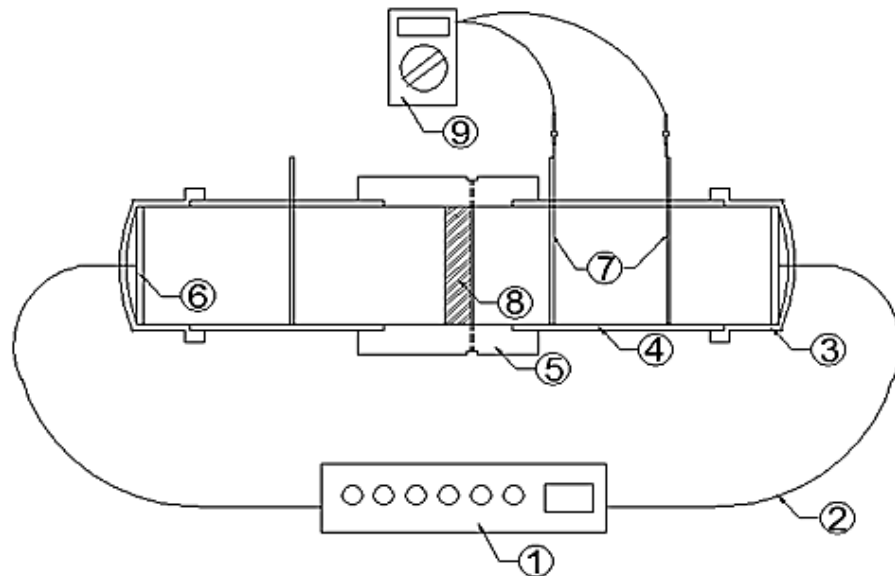
Figura 37: Espumas de polímero Rosa 01 e Branca 02 de 71,50mm de diâmetro e 21,00mm de espessura.



Fonte: A autora, 2017.

Os equipamentos que compõem o aparato de tortuosidade estão indicados e enumerados conforme o esquema na Figura 38.

Figura 38: Desenho esquemático da bancada de tortuosidade.

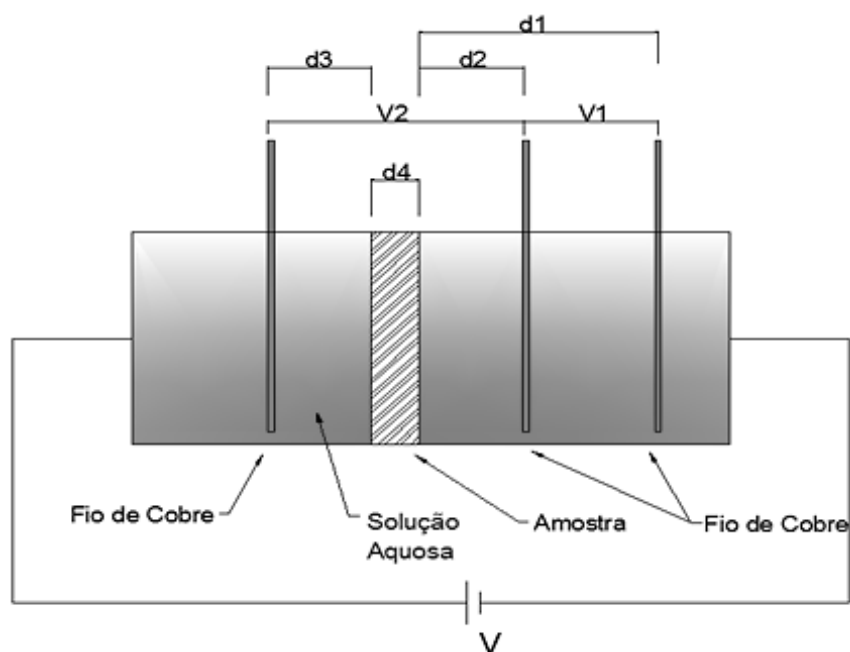


1-Estabilizador de tensão DC 30V e 5^a; 2-Fios elétricos; 3-Caps de PVC; 4-Tubo PVC; 5-Porta amostra de nylon; 6-Chapas metálicas de aço inoxidável; 7-Hastes de cobre; 8-Amostra de espuma de Polímero Rosa e Amarela; 9-Multímetro para medição de tensão.

Fonte: Bruno Mattos, 2017.

O funcionamento da bancada consiste em criar um campo elétrico, através de chapas metálicas fixadas nas extremidades interiores do cilindro de PVC, que passa pelo porta-amostra localizado no centro do cilindro. As chapas ficam conectadas ao estabilizador de tensão e são utilizadas como eletrodos. Os valores da condutividade elétrica do fluido são representados por V1, e a condutividade elétrica da amostra é mostrada por V2, sendo as dimensões d1, d2, d3 e d4 em milímetros, Figura 39.

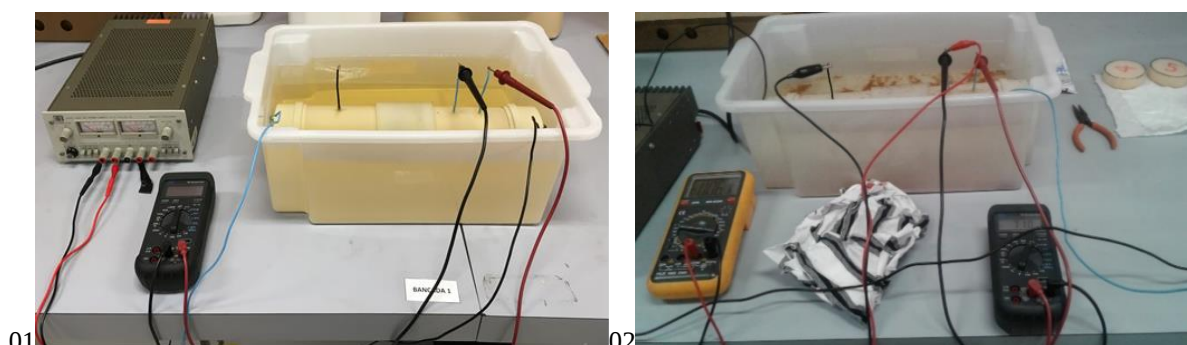
Figura 39: Disposição das tensões V1 e V2 e as respectivas distâncias d1, d2, d3 e d4.



Fonte: Bruno Mattos, 2017.

A medição deste experimento se iniciou com a amostra de espuma de polímero no interior do tubo que ficou totalmente submerso em 10 litros de Sulfato de cobre (CuSO_4) 0,1 mol/l de concentração. Após isso, ligou-se a fonte de tensão para estabelecer a diferença de potencial e realizou-se as medições. O multímetro apresentou os valores de V1 e V2 que variou a tensão do campo elétrico em 18V, 21V e 24V respectivamente. Esse procedimento foi repetido para todas as amostras.

Figura 40: Bancada de tortuosidade antes 01 e depois do experimento 02 com espuma de polímero.



Fonte: Bruno Mattos, 2017 e Bittencourt, 2018.

Os resultados das medições, figura 39, referentes a distância d4 (espessura da amostra) foram calculados juntamente com os resultados da porosidade das espumas rosa e branca (Porosidade em água) na equação (92) da tortuosidade, tal como a Tabela 12. Entretanto, os dados da espuma rosa foram retirados por apresentarem uma alta taxa de flutuação em seus

dados. A Tabela 12 demonstra menos flutuações em seus resultados de porosidade e tortuosidade da espuma branca.

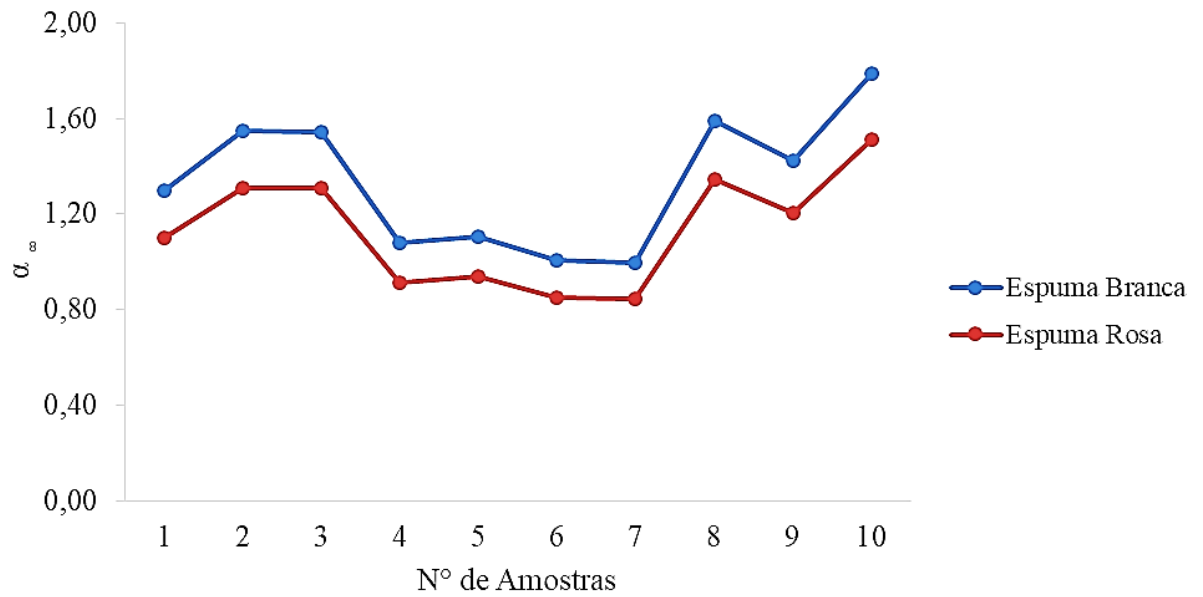
Tabela 12: Resultado da tortuosidade de dez amostras de espuma branca de porosidade 0,558, que foram feitas em água.

Tortuosidade Espuma Branca	
1,300	
1,549	
1,545	
1,082	
1,107	
1,008	
0,997	
1,592	
1,425	
1,786	
Média	1,339
Desvio P.	0,280

Fonte: A autora, 2018.

A tortuosidade das espumas brancas apresenta uma similaridade de seus resultados em relação a espuma rosa; porém, a espuma branca demonstrou maior índice de tortuosidade, onde a variação de seu resultado foi da ordem de $1,3 \pm 0,8$, enquanto que a espuma rosa apresentou $1,13 \pm 0,7$. O Gráfico 2 apresenta uma variação nos resultados da tortuosidade da espuma branca, em que a tortuosidade variou entre 1 à 1,8, enquanto que a espuma rosa apresentou resultados de 1,55 à 0,8, sendo considerado muito abaixo para tortuosidade.

Gráfico 2: Resultado da medição das espumas Branca e Rosa na bancada de tortuosidade.



Fonte: Gráfico feito em Excel, 2018.

Implicações

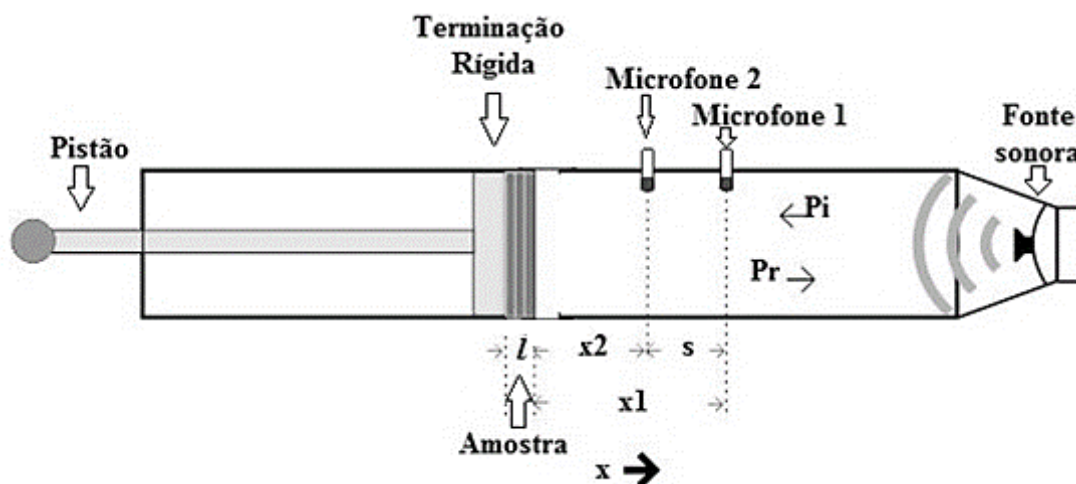
O método foi abandonado porque os dados gerados através do ensaio de porosidade com espuma branca não apresentaram precisão suficiente para serem aplicados na equação de tortuosidade, o que poderia gerar resultados sem confiabilidade, já que não havia uma constância nos resultados das medições de porosidade. Outra questão que impossibilitou ao método de tortuosidade ter continuidade é o fato que as amostras de fibras naturais não poderiam ser medidas, pois o uso de líquido causaria uma reação com a cola de PVA, dissolvendo a cola e, conseqüentemente, desmanchando as amostras.

6.5 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA H_{12}

O método da função de transferência H_{12} , criado por Seybert & Ross (1977) e aperfeiçoado por Chung & Blaser (1980), hoje é dirigido pela norma ASTM E 1050 -10, que orienta vários outros métodos de medições em tubo de impedância. Esta técnica foi utilizada para esta dissertação, com finalidade de determinar as propriedades acústicas do material, através de medições de pressão em amostras de fibras naturais, em dois pontos distintos, dentro do tubo com dois microfones. A ferramenta de uso de dados, o tubo de impedância, possibilitou medições em grandes faixas de frequência, em uma velocidade eficaz.

O experimento consistiu no uso do tubo de impedância, que se caracteriza por apresentar, em uma extremidade, uma fonte sonora e, na outra extremidade, um pistão (que ajuda a posicionar as amostras a serem medidas). Os microfones ficam posicionados ao longo do tubo, separados por uma distância entre si “s”, em uma posição x_1 e x_2 da face frontal da amostra a ser medida, com uma pressão incidente P_i e pressão refletida P_r . O desenho esquemático, Figura 41, demonstra como é a configuração do tubo de impedância em questão:

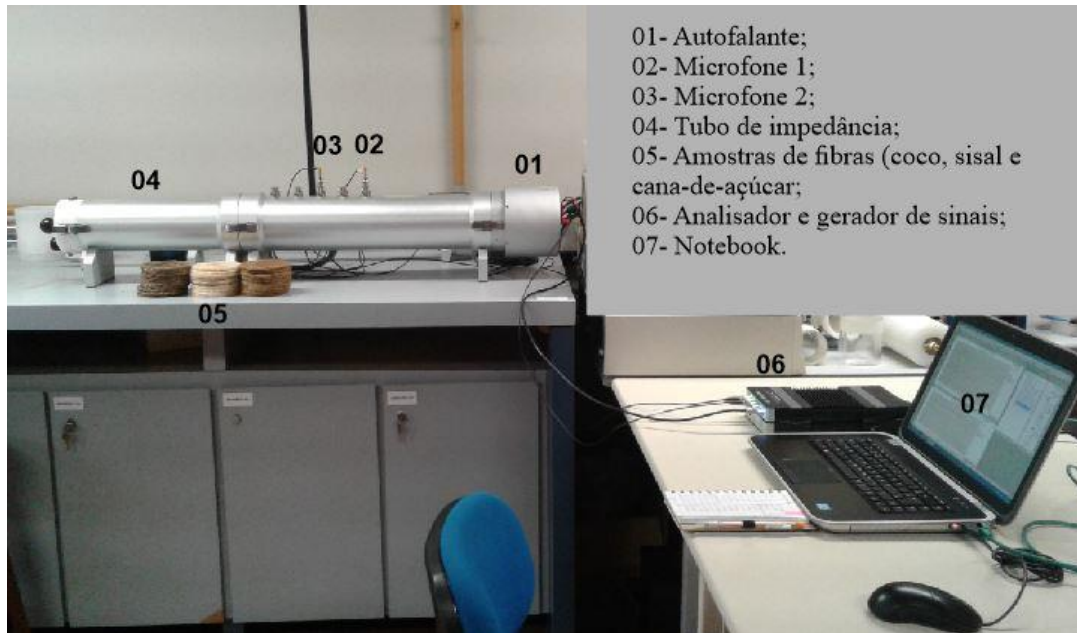
Figura 41: Esquema ilustrativo do tubo de impedância para o método da função de transferência conforme a norma ASTM 1050-10.



Fonte: A autora, 2018.

Na Figura 42, são mostrados os equipamentos utilizados para a determinação do Coeficiente de absorção sonora, impedância característica e número de onda complexo das amostras de fibras naturais com os métodos da Função de Transferência (SEYBERT & ROSS, 1977; CHUNG & BLASER, 1980).

Figura 42: Bancada para experimentos em Tubo de impedância para as propriedades acústicas.



Fonte: A autora, 2018.

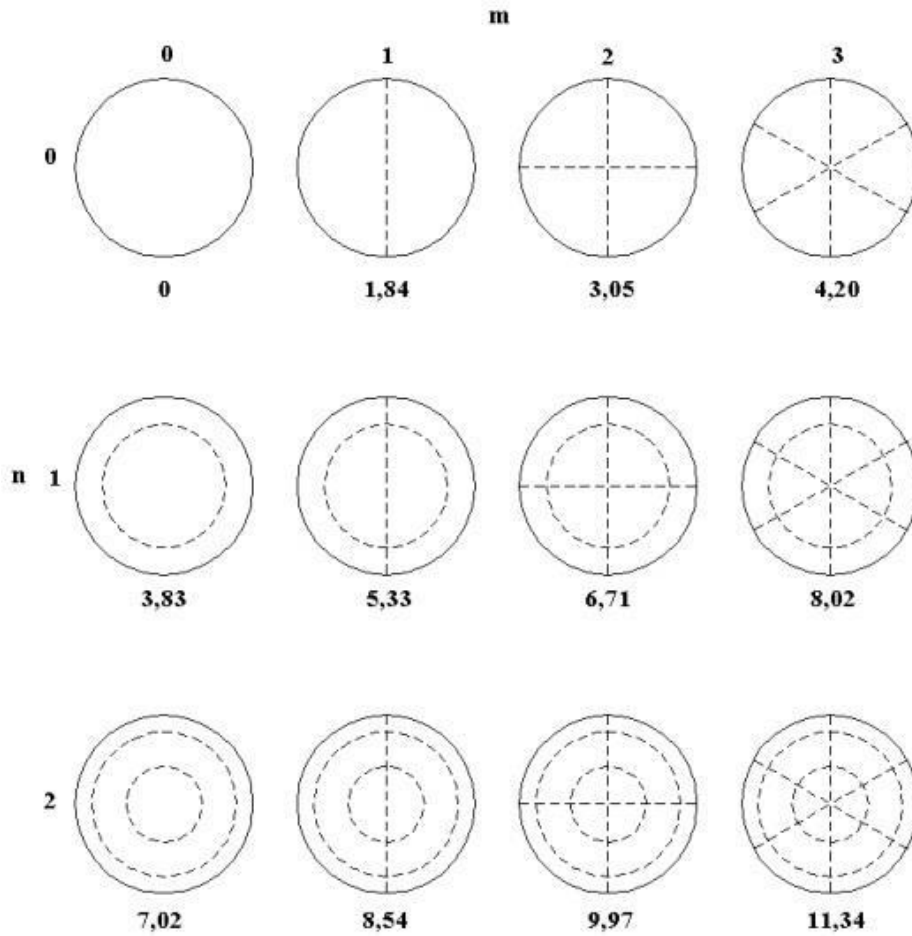
Para garantir que ocorra a propagação de ondas planas no interior do tubo, propriedade indispensável para aplicação do método da função de transferência, a frequência da onda sonora de excitação emitida pela fonte não deve ultrapassar a frequência de corte f_c . Nos dutos circulares, n representa o número de zeros da derivada $m J'$. A Figura 43 mostra a distribuição da pressão transversal em dutos circulares em que “ n ” corresponde ao número de nós circulares. A propagação de ondas planas é representada pelo modo (0,0) e os índices “ m ” e “ n ” representam o número de nós da distribuição de pressão nas suas respectivas direções.

Os primeiros modos (1,0) e (0,1) possuem frequência de corte se $x,0,1 k$ e $x,1,0 k$ forem números reais, ou seja, $r,1,0 k > k$ e $r,0,1 k > k$. Sendo assim, o primeiro zero de $1 J'$ ocorre em 1,84 e o segundo zero em de $0 J'$ ocorre em 3,83. Portanto, os números de onda para as frequências de corte serão o $1,84/ r$ e o $3,83/ r$, respectivamente. Em outras palavras, o primeiro modo azimutal ou diametral começa a se propagar em $kr_0 1,84$ e o primeiro modo axi-simétrico em $kr_0 3,83$. Logo, Considera-se a propagação de ondas planas no interior de um duto como $kr 1,84$ (ERIKSSON, 1980).

A frequência de corte para baixa frequência é calculada de acordo com a equação (93), em que c é a velocidade do som, D é o diâmetro da amostra em mm, assim sendo:

$$f_c < \frac{1,84c}{\pi D} \quad (93)$$

Figura 43: Linhas nodais para distribuição transversal de pressão num duto circular para $m=3$ e $n=2$.



Fonte: Eriksson, 1980.

Alguns cuidados devem ser tomados para a realização de ensaios utilizando o tubo de impedância, segundo a norma ASTM E1050-10 (2012):

1. A superfície interna do tubo de impedância deve ser lisa, limpa e não porosa para evitar atenuação sonora;
2. A seção transversal do tubo deve se manter constante ao longo de toda a extensão do tubo de impedância;
3. É necessária uma distância mínima de três vezes o diâmetro interno do tubo entre a fonte sonora e os microfones. Isso garante que ondas planas completamente desenvolvidas alcancem os microfones e a amostra.
4. É recomendado revestir o tubo de impedância com um material de absorção sonora próximo à fonte sonora com a finalidade de minimizar os efeitos da ressonância da coluna de ar no tubo;

5. Também é necessária uma distância mínima entre os microfones e a amostra a ser analisada. Para amostra com superfície plana, o microfone mais próximo da amostra deve estar a uma distância mínima de meio diâmetro interno do tubo de impedância. Para amostra com superfície não homogênea, o microfone mais próximo da amostra deve estar a uma distância mínima de um diâmetro interno do tubo. Para amostra com superfície assimétrica, o microfone mais próximo deve estar no mínimo a dois diâmetros interno do tubo de distância.

O tubo de impedância é da marca SCS 9020B/K com 100 mm de diâmetro interno. O analisador e gerador de sinais é da marca Brüel & Kjær Type 3160-A-042 de seis canais, sendo quatro canais de entrada e dois canais de saída, Figura 44. Os microfones utilizados para a aquisição dos sinais foram o Brüel & Kjær Type 4935 de 1/4", pré-polarizados, com pré-amplificadores e transdutores de identificação. Sua sensibilidade nominal é de 5,6 mV/Pa, Figura 45.

Figura 44: Analisador e gerador de sinal Brüel & Kjaer, type 3106-A-042.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 45: Microfones Brüel & Kjaer type 4935 de 1/4" pré-amplificados.



Fonte: Terashima, 2016.

A onda que propaga no interior de um tubo é conhecida como onda plana, e, nesse caso, o campo de pressão sonora é dado pela equação (94):

$$P(x, t) = Ae^{i(\omega t - kx)} + Be^{i(\omega t + kx)} \quad (94)$$

Considerando as pressões $p1$ e $p2$, no domínio do tempo, sendo medidas pelos microfones 1 e 2, tais como:

$$p1(t) = Ae^{i(\omega t - kx1)} + Be^{i(\omega t + kx1)} \quad (95)$$

$$p2(t) = Ae^{i(\omega t - kx2)} + Be^{i(\omega t + kx2)} \quad (96)$$

Em que A e B são as amplitudes das ondas que se propagam nas direções negativa e positiva, respectivamente, junto ao eixo x . Para equacionar a função de transferência H_{12} dos microfones 1 e 2, é necessário ter a razão entre a pressão $p2$, medida no microfone 2, em relação a pressão $p1$ medida no microfone 1. A função de transferência H_{12} pode ser calculada de acordo com a eq. (97):

$$H_{12}(f) = \frac{p2(t)}{p1(t)} = \frac{Ae^{i(\omega t + kx2)} + Be^{i(\omega t - kx2)}}{Ae^{i(\omega t + kx1)} + Be^{i(\omega t - kx1)}} \quad (97)$$

A eq. (97) pode ser melhor entendida, de maneira que simplifique nos termos semelhantes do numerador e denominador, e com isso, divida a amplitude da onda progressiva do numerador B pelo denominador A ; então, tem-se:

$$H_{12}(f) = \frac{\frac{e^{ikx2} + B}{Ae^{-ikx2}}}{\frac{e^{ikx1} + B}{Ae^{-ikx1}}} \quad (98)$$

O coeficiente de reflexão sonora $R(f)$, pode ser calculado entre a razão da amplitude da onda refletida com a amplitude da onda incidente, conforme Allard & Atalla (2009) e Munjal (2013), de forma que:

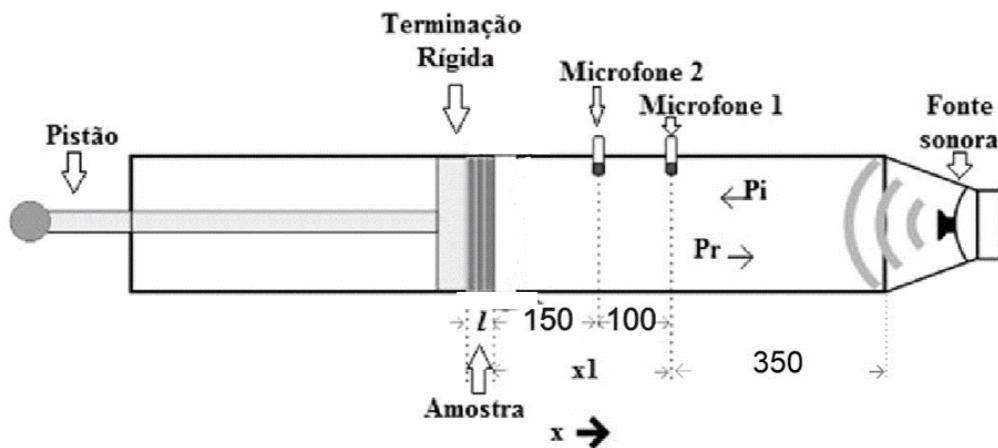
$$R(f) = \left| \frac{B}{A} \right| \quad (99)$$

No caso da ocorrência da dissipação de energia sonora no interior da amostra, a amplitude da onda refletida é menor que a amplitude da onda incidente. Com a equação (99) e

a (100), pode-se obter o coeficiente de reflexão $R(f)$ em função da função de transferência H_{12} . A Figura 46, apresenta as distâncias dos microfones usadas para gerar os dados da função de transferências.

$$R(f) = \frac{H_{12}e^{ikx_1} - e^{-ikx_2}}{e^{-ikx_2} - H_{12}e^{-ikx_1}} \quad (100)$$

Figura 46: Distâncias dos microfones do tubo de impedância.



Fonte: A autora, 2018.

De acordo com os dados da Figura 46, considerando $x_2 = x_1 - s$ e substituindo o valor de x_2 na equação (100), tem-se:

$$R(f) = \frac{H_{12} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}} e^{2ikx_1} \quad (101)$$

Nesse caso, o coeficiente de absorção α , na função da frequência de excitação da onda sonora incidente, por Chung & Blaser (1980), é dado por:

$$\alpha(f) = 1 - |R|^2 \quad (102)$$

A impedância superficial Z_s , Seybert & Ross (1977), da amostra é obtida através da equação (103), em que a impedância característica do ar é $Z_{ar} = \rho_{ar} c$.

$$Z_s(f) = Z_{ar} \frac{(1 + R)}{1 - R} \quad (103)$$

Com os dados gerados pelo tubo de impedância, através dos sinais gerados pelos microfones 1 e 2, a função de transferência também pode ser obtida, tal como:

$$H_{12} = \frac{p_2(f)}{p_1(f)} = \frac{G_{12}(f)}{G_{11}(f)} \quad (104)$$

Considerando $G_{11}(f)$ como a densidade de auto espectral ou o espectro de potência do microfone 1. O $G_{12}(f)$ é a densidade espectral cruzada ou o espectro cruzado de potência do microfone 2 em relação ao microfone 1. As duas densidades G_{11} e G_{12} podem ser obtidas conforme as equações (105) e (106), respectivamente.

$$G_{11}(f) = \frac{1}{2} [p_1(f)p_1^*(f)] \quad (105)$$

$$G_{12}(f) = \frac{1}{2} [p_2(f)p_1^*(f)] \quad (106)$$

Em que o sobrescrito ($\cdot$) é denominado como um complexo conjugado. No caso em que o denominador da equação (101) tende a zero, o coeficiente de reflexão torna-se indeterminado, sendo:

$$e^{iks} - H_{12} = 0 \quad (107)$$

Isso ocorre quando o produto entre o número de onda em propagação k no interior do tubo e o espaçamento entre os microfones s é um múltiplo interior de π , em que para $m=1,2,3..$, tal como:

$$ks = m\pi \quad (108)$$

Lembrando que $k=\omega/c$, logo a equação (108) pode ser reescrita em função da frequência de excitação f , em que:

$$s < \frac{c}{2f} \quad (109)$$

Estudos de Seybert - Soenarko (1981) comprovaram que erros sistemáticos são reduzidos quando microfones são posicionados próximos das amostras. Os erros aleatórios são

minimizados quando há alta coerência entre os sinais adquiridos pelos dois microfones, e o aumento da coerência ocorre quando com a diminuição do espaçamento entre os microfones. Entretanto, a menor distância entre os microfones pode reduzir a precisão das medições em baixas frequências. Isso se deve a erros que ocorrem quando $k_s \rightarrow 0$ ou $k_s \rightarrow \pi$. Um outro fenômeno do experimento importante a ser mencionado para ocorrer a baixa coerência é quando um microfone está localizado em um ponto nodal do campo sonoro, Vér - Beranek (2006).

$$\gamma_{12}^2 = \frac{|G_{12}|^2}{G_{11}G_{22}} \quad (110)$$

Sendo que $G_{12}(f)$, equação (106), é a densidade de auto espectral ou espectro de potência do microfone 2. Para uma boa precisão nos resultados de medição das propriedades acústicas, estudos feitos em 1986 de Bodén & Abom, verificaram que os espaçamentos entre os microfones de acordo com as seguintes faixas de frequência são melhores nas faixas de $0,1\pi < k_s < 0,8\pi$.

As frequências f_{min} mínima e f_{max} máxima de utilização do tubo de impedância podem ser calculadas de acordo com o número de onda k_c , em que:

$$f_{min} > \frac{0,1c}{2s} \quad (111)$$

$$f_{max} < \frac{0,8c}{2s} \quad (112)$$

CAPÍTULO 7

ANÁLISES E RESULTADOS

A propriedade do material determinante para definir se a porosidade do material é de qualidade e confiável para absorção acústica é a avaliação do coeficiente de absorção (α). Essa propriedade pode ser trabalhada com várias metodologias. Os métodos avaliativos que demonstraram eficiência para a aquisição do coeficiente de absorção nesta dissertação foram três: método experimental função de transferência e dois métodos empíricos, Delany & Bazley e Allard & Champoux, objetivando a comparação dos resultados do coeficiente de absorção nas amostras de fibras naturais de coco, sisal e cana-de-açúcar.

O método experimental de Resistividade ao fluxo foi efetivado para servir de base de dados as equações empíricas clássicas. Sendo regidas e orientadas pela Norma ASMT C 522-03(2009), as medições foram feitas com as fibras naturais citadas acima, em um determinado fluxo de ar passante pela amostra no interior de tubo, sendo a amostra avaliada em dois pontos distintos através de um diferencial de pressão.

Os resultados foram obtidos de acordo com a seguinte ordem:

1. **Aplicação dos métodos empíricos das Equações de Delany e Bazley (1970):** O modelo matemático das equações empíricas, que descrevem a propagação da onda sonora em materiais fibrosos, com a impedância característica e o coeficiente de propagação;
2. **Aplicação dos métodos empíricos das equações de Allard e Champoux (1991):** Elaboraram um modelo matemático a partir de Delany e Bazley, para melhorar o comportamento do Coeficiente de absorção sonora em baixas frequências;
3. **Avaliação experimental através do método da função de transferência:** O método experimental dispõe de um tubo de impedância, no qual são feitas medições dos materiais em questão, entre as frequências de 100 e 1600Hz. O experimento tem como base a norma ASTM E1050-10;

Comparação dos Resultados:

Após as avaliações, foi realizado um comparativo dos resultados encontrados para apresentar diretrizes no uso dos métodos empíricos avaliados.

Os modelos experimentais de porosidade e tortuosidade não puderam ser concluídos por não se apresentarem confiáveis conforme descrito no Capítulo 6.

7.1 AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE DE FLUXO - ASTM C 522-03 (2009).

Para direcionar e iniciar os estudos da propagação sonora em materiais fibrosos, foi realizada a avaliação experimental de resistividade ao fluxo (σ) nas amostras de fibras de coco, sisal e cana-de-açúcar. Todos os resultados avaliados deste experimento serão mostrados neste capítulo. Inicialmente foi determinado a densidade das amostras para verificar a sua uniformidade com relação a sua massa.

No total, foram fabricadas 50 amostras de cada material, sendo utilizadas 40 amostras de cada fibra para o experimento de resistividade e 10 amostras de cada fibra de diâmetro 100 mm para o experimento da função de transferência. A Tabela 13 ilustra a densidade e a espessura das amostras fabricadas:

Tabela 13: Propriedades das amostras.

Material	Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)
Coco	202,3±14,6	5,51±0,53
Sisal	214,6±8,8	5,05±0,18
Cana-de-açúcar	200,81±10,8	5,02±0,17

Fonte: A autora, 2018.

No comparativo da Tabela 13, as amostras de sisal e cana-de-açúcar demonstram ser mais homogêneas com relação as amostras de coco de acordo com espessura. As medições de σ foram realizadas combinando as amostras de 5 mm com combinações de 7 amostras para cada tipo de fibra. As combinações foram necessárias, pois somente uma amostra geraria resultados insatisfatórios por apresentar uma pouca perda de carga. Portanto, foram combinadas sete amostras de 5 mm de espessura, intercalando posições, para efetuar as medições de resistividade de fluxo. Nesta etapa, foram testadas amostras de 62,0, 71,5, 80,0 e 89,5 mm de diâmetro. As combinações realizadas são mostradas nas Tabelas 14 a 16.

Tabela 14: Combinações das amostras de fibra de coco de espessura de 5 mm. As lacunas vazias representam resultados espúrios.

Fibra de coco				
	62mm	71,5mm	80mm	89,5mm
1	2,3,5,6,7,9,10	-	2,3,4,5,6,7	2,3,4,5,6,7,10
2	1,3,5,6,7,9,10	1,3,4,5,6,7,8	1,3,4,5,6,7	1,3,4,5,6,7,10
3	12,5,6,7,9,10	1,2,4,5,6,7,8	1,2,4,5,6,7	1,2,4,5,6,7,10
4	1,2,3,6,7,9,10	1,2,3,5,6,7,8	1,2,3,5,6,7	1,2,3,5,6,7,10
5	1,2,3,5,7,9,10	1,2,3,4,6,7,8	1,2,3,4,6,7	1,2,3,4,6,7,10
6	1,2,3,5,6,9,10	1,2,3,4,5,7,8	1,2,3,4,5,7	1,2,3,4,5,7,10
7	1,2,3,5,6,7,10	1,2,3,4,5,6,8	1,2,3,4,5,6	1,2,3,4,5,6,10
8	1,2,3,5,6,7,9	1,2,3,4,5,6,7	-	1,2,3,4,5,6,7

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 15: Combinações das amostras de fibra de sisal de espessura de 5 mm. As lacunas vazias representam resultados espúrios.

Fibra de sisal				
	62mm	71,5mm	80mm	89,5mm
1	1,2,3,5,6,7,8	-	1,2,3,4,5,6,7	2,3,4,5,6,7,8
2	2,3,5,6,7,8,9	3,4,5,6,7,8,9	2,3,4,5,6,7,10	3,4,5,6,7,8,9
3	3,5,6,7,8,9,1	4,5,6,7,8,9,10	3,4,5,6,7,10,1	4,5,6,7,8,9,10
4	5,6,7,8,9,1,2	-	4,5,6,7,10,1,2	5,6,7,8,9,10,2
5	6,7,8,9,1,2,3	6,7,8,9,10,1,3	5,6,7,10,1,2,3	6,7,8,9,10,2,3
6	7,8,9,1,2,3,5	7,8,9,10,1,3,4	6,7,10,1,2,3,4	7,8,9,10,2,3,4
7	8,9,1,2,3,5,6	8,9,10,1,3,4,5	7,10,1,2,3,4,5	8,9,10,2,3,4,5
8	9,1,2,3,5,6,7	9,10,1,3,4,5,6	10,1,2,3,4,5,6	9,10,2,3,4,5,6
9	-	10,1,3,4,5,6,7	-	10,2,3,4,5,6,7

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 16: Combinações das amostras de fibra de Cana-de-açúcar de espessura de 5 mm. As lacunas vazias representam resultados espúrios.

Fibra de cana-de-açúcar				
	62mm	71,5mm	80mm	89,5mm
1	1,2,3,5,6,8,9	1,2,3,4,6,7,8	1,2,3,6,7,8,9	-
2	2,3,5,6,8,9,10	2,3,4,6,7,8,10	2,3,6,7,8,9,10	2,3,5,6,7,8,9
3	3,5,6,8,9,10,1	3,4,6,7,8,10,1	3,6,7,8,9,10,1	3,5,6,7,8,9,1
4	5,6,8,9,10,1,2	4,6,7,8,10,1,2	6,7,8,9,10,1,2	5,6,7,8,9,1,2
5	6,8,9,10,1,2,3	6,7,8,10,1,2,3	7,8,9,10,1,2,3	6,7,8,9,1,2,3
6	8,9,10,1,2,3,5	7,8,10,1,2,3,4	8,9,10,1,2,3,6	7,8,9,1,2,3,5
7	9,10,1,2,3,5,6	8,10,1,2,3,4,6	9,10,1,2,3,6,7	-
8	-	-	-	9,1,2,3,5,6,7

Fonte: A autora, 2018.

Nesta etapa, foram realizadas combinações entre as amostras de mesmas fibras, em resistividade ao fluxo, com combinações de no mínimo seis e máximo sete amostras,

intercalando a ordem entre elas, em dez velocidades v [mm/s] (de 5 à 10 mm/s), Tabela 18. A Tabela 17 mostra a perda de carga obtida nos ensaios. As demais tabelas podem ser encontradas no Apêndice G.

Tabela 17: Perda de carga representada pela variação de pressão nas amostras de cana-de-açúcar, 71 de diâmetro.

v [mm/s]	1,3,4,5,6,7,8	1,2,4,5,6,7,8	1,2,3,5,6,7,8	1,2,3,4,6,7,8	1,2,3,4,5,7,8	1,2,3,4,5,6,8	1,2,3,4,5,6,7
5	-	-	-	-	-	-	-
10	1,6	1,7	1,6	1,4	1,4	1,3	1,4
15	2,4	2,5	2,5	2,1	2,1	2	2,2
20	3,3	3,4	3,4	2,9	2,9	2,7	3,0
25	4,1	4,3	4,2	3,7	3,6	3,4	3,7
30	5,0	5,2	5,1	4,5	4,4	4,1	4,5
35	5,9	6,1	6	5,2	5,2	4,9	5,3
40	6,7	7,1	7,0	6,0	6,0	5,9	6,2
45	7,3	8,4	8,1	7,2	7,1	6,8	7,3
50	8,1	9,5	9,2	8,1	7,9	7,4	8,1

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 18: Resultado de sete medições de sete amostras de coco intercaladas entre si.

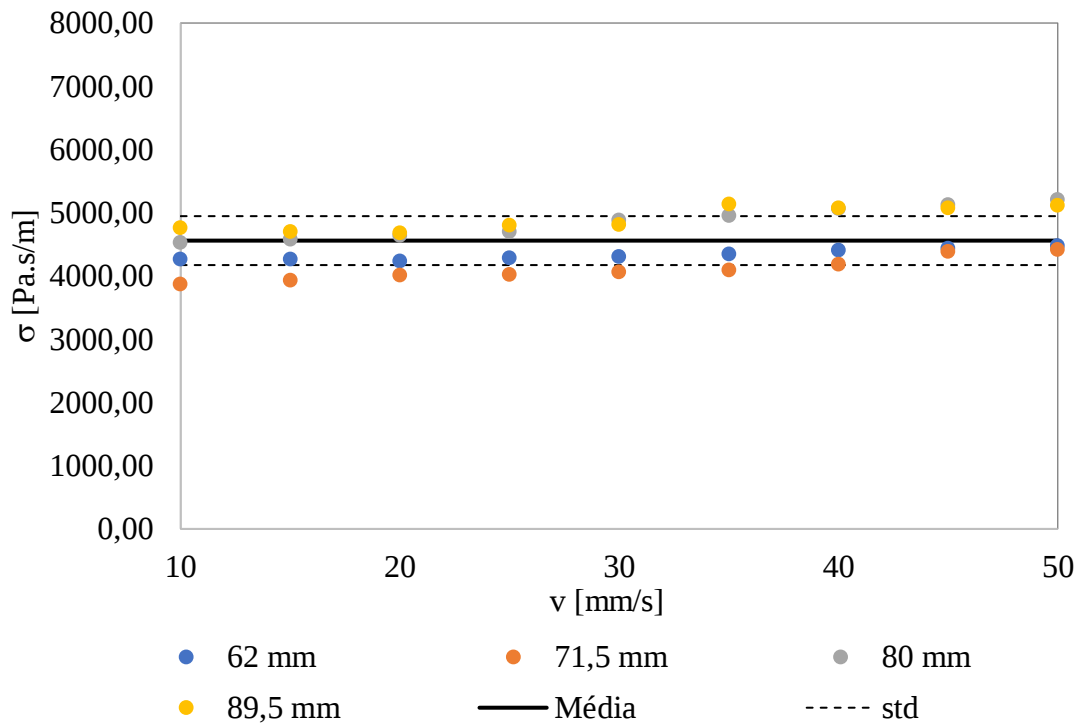
v [mm/s]	1,3,4,5,6,7,8	1,2,4,5,6,7,8	1,2,3,5,6,7,8	1,2,3,4,6,7,8	1,2,3,4,5,7,8	1,2,3,4,5,6,8	1,2,3,4,5,6,7	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	4533,33	4166,67	3645,83	3655,35	3385,42	3645,83	4087,19	3874,23
15	4444,44	4340,28	3645,83	3655,35	3472,22	3819,44	4178,02	3936,51
20	4533,33	4427,08	3776,04	3785,90	3515,63	3906,25	4223,43	4023,95
25	4586,67	4375,00	3854,17	3759,79	3541,67	3854,17	4250,68	4031,73
30	4622,22	4427,08	3906,25	3829,42	3559,03	3906,25	4268,85	4074,16
35	4647,62	4464,29	3869,05	3879,15	3645,83	3943,45	4281,82	4104,46
40	4733,33	4557,29	3906,25	3916,45	3841,15	4036,46	4359,67	4192,94
45	4977,78	4687,50	4166,67	4119,52	3935,19	4224,54	4662,43	4396,23
50	5066,67	4791,67	4218,75	4125,33	3854,17	4218,75	4686,65	4423,14

Fonte: A autora, 2018.

Os Gráficos seguintes fazem referências as medições das 28 amostras de fibras naturais de diâmetros iguais a 62, 71,5, 80 e 89,5 mm, em bancada de resistividade ao fluxo, contudo, foram usadas 40 amostras de cada fibra, sendo que a tabela e os gráficos só apresentam os dados relevantes do experimento. Como por exemplo, o Gráfico 3 apresenta a resistividade para as amostras de fibra de coco, em que os diâmetros 89,5 mm e 80 mm, apresentam maiores valores, variando de 4533 Pa.s/m² à 5121 Pa.s/m². As amostras de diâmetro 71,5 mm demonstraram menores valores, variando de 3874 Pa.s/m² à 4423 Pa.s/m². Os resultados apresentaram uma linearidade quase constante, semelhante aos resultados das amostras de sisal, Gráficos 4. Esta linearidade alcançada é preconizada pela norma ASTM C522-3. Entretanto, as amostras de cana-de-açúcar, Gráfico 5, apresentaram uma maior dispersão nos valores de resistividade, isto

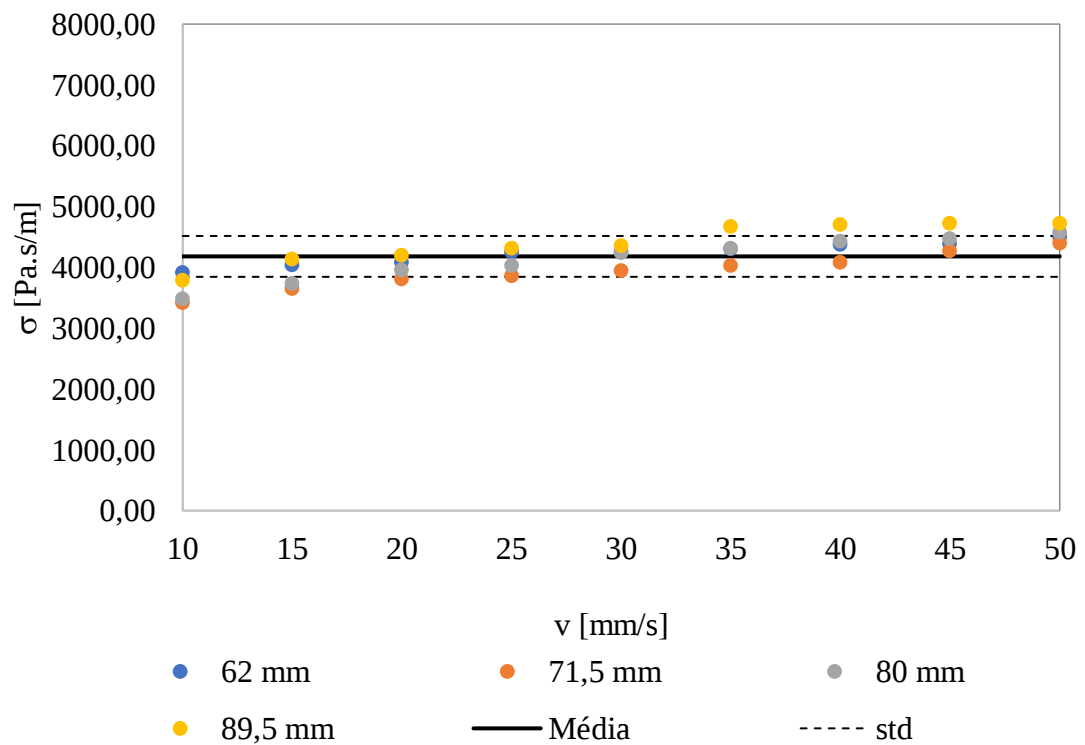
pode ter ocorrido pela falta de uniformidade da distribuição das fibras no molde, ou por várias colunas de ar na amostra ou por apresentar fibras em corte bem pequeno.

Gráfico 3: Resultado da resistividade ao fluxo das amostras de fibras de coco.



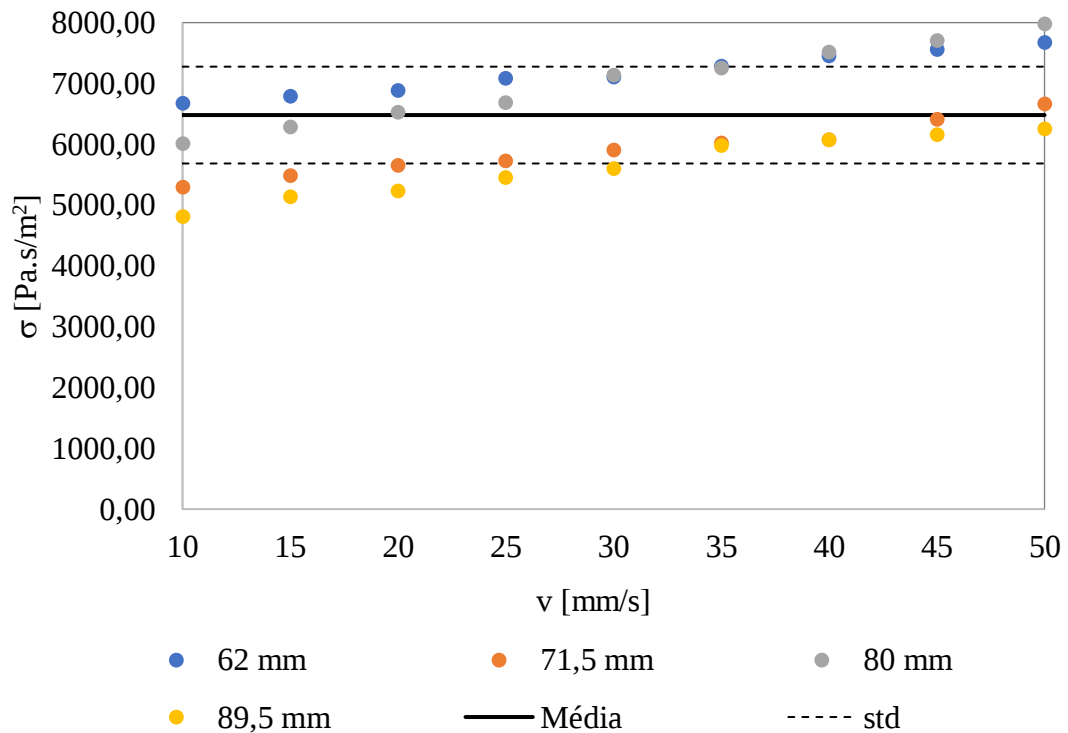
Fonte: A autora, 2018.

Gráfico 4: Resultado da resistividade ao fluxo das amostras de fibras de sisal.



Fonte: A autora, 2018.

Gráfico 5: Resultado da resistividade ao fluxo das amostras de fibras de Cana-de-açúcar.



Fonte: A autora, 2018.

A Tabela 19 apresenta as médias para a resistividade de fluxo obtida para todas as amostras avaliadas. Cabe lembrar aqui que foram avaliadas 7 combinações de cada material para os diâmetros de 62,0, 71,5, 80,0 e 89,5 mm, totalizando 28 avaliações.

Tabela 19: Resultados das médias da resistividade ao fluxo de todas as amostras.

Material	Resistividade de Fluxo (σ) [Pa.s/m ²]	Desvio Padrão [Pa.s/m ²]
Coco	4559	± 387
Sisal	4180	± 336
Cana-de-açúcar	6480	± 796

Fonte: A autora, 2018.

Todos os resultados de σ das amostras ficaram dentro da faixas da Resistência ao Fluxo (R_0), equação (49), compreendida entre 100 a 10.000 Pa.s/m, conforme recomendado pela norma ASTM C522-03, ou seja, $159,6 \pm 13,5$, $146,3 \pm 11,8$ e $226,0 \pm 27,9$ Pa.s/m, para o coco, sisal e cana-de-açúcar respectivamente.

7.2 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS EMPÍRICOS.

7.2.1 Método empírico de Delany e Bazley (1970).

Com posse dos valores de resistividade ao fluxo σ e da formulação empírica de Delany e Bazley (1970), eq. (63) e (64), pode-se determinar a impedância característica Z_c , o número de onda complexo k_c , das amostras em estudo. Sendo assim, obtêm-se os seguintes dados para as amostras de coco, sisal e cana-de-açúcar, respectivamente:

$$\frac{Z_{ccoco}}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.0511 \left(\frac{f}{4559} \right)^{-0.75} - i0.07688 \left(\frac{f}{4559} \right)^{-0.73} \quad (113)$$

$$\frac{k_{ccoco}}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.0858 \left(\frac{f}{4559} \right)^{-0.70} - i0.1749 \left(\frac{f}{4559} \right)^{-0.59} \quad (114)$$

$$\frac{Z_{csisal}}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.0511 \left(\frac{f}{4180} \right)^{-0.75} - i0.07688 \left(\frac{f}{4180} \right)^{-0.73} \quad (115)$$

$$\frac{k_{csisal}}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.0858 \left(\frac{f}{4180} \right)^{-0.70} - i0.1749 \left(\frac{f}{4180} \right)^{-0.59} \quad (116)$$

$$\frac{Z_{ccana}}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.0511 \left(\frac{f}{6480} \right)^{-0.75} - i0.07688 \left(\frac{f}{6480} \right)^{-0.73} \quad (117)$$

$$\frac{k_{ccana}}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.0858 \left(\frac{f}{6480} \right)^{-0.70} - i0.1749 \left(\frac{f}{6480} \right)^{-0.59} \quad (118)$$

Relembrando que, de acordo com a formulação de Delany & Bazley, a formulação apresenta boa aproximação para predição de Z_c e k_c para as faixas de frequência compreendidas entre $0.01 \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1.00$, (ver seção 4.2). Neste caso, são esperados bons resultados para as faixas de frequências compreendidas entre $45,6 \leq f \leq 4559$ Hz, $41,8 \leq f \leq 4180$ Hz e $64,8 \leq f \leq 6480$ Hz para as amostras de coco, sisal e cana-de-açúcar.

7.2.2 Método Empírico de Allard&Champoux (1991)

De acordo com as equações de Allard & Champoux, equações (71) e (72), os valores das constantes aplicadas as suas equações são: $\rho_o = 1,21\text{kg/m}^3$, $N_{pr} = 0.712$, $\gamma = 1.4$ e $P_o = 101,3$ kPa N/m². Em que as equações (71) e (72) podem ser reescritas como:

$$\rho(\omega) = \rho_o + \left[-0,0253 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-2} - 0,0796i \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-1} \right]^{1/2} \quad (119)$$

$$K(\omega) = 141,82 \cdot 10^2 \left(1,4 - \frac{0,4}{1 - 0,0559i \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-1} \left[8,111 + 25,482 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{1/2} \right]} \right)^{-1} \quad (120)$$

Com posse das equações (119) e (120), pode-se encontrar o número de onda complexo K_c e a impedância característica Z_c através das equações (121) e (122).

$$kc(\omega) = i2\pi \left[\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)} \right]^{1/2} \quad (121)$$

$$Z_c(\omega) = [\rho(\omega)K(\omega)]^{1/2} \quad (122)$$

Com a resistividade ao fluxo (σ) e propriedades descritas pelas equações 119 a 122, pode-se encontrar o coef. de absorção (α) das amostras através das equações 123 e 124, ou seja:

$$Z_s = Z_c \coth kcl \quad (123)$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_c - \rho_o c_o}{Z_s + \rho_o c_o} \right|^2 \quad (124)$$

Os Gráficos 06 a 09 mostram um comparativo da impedância complexa normalizada e do número de onda complexo normalizado. Nestes gráficos, as siglas DB e AC simbolizam as

metodologias criadas por Delany & Bazley e Allard & Champoux, e é possível observar as pequenas variações das propriedades e a altas frequências.

Gráfico 6: Comparação entre a parte real (Z_c) normalizado entre os dois métodos empíricos.

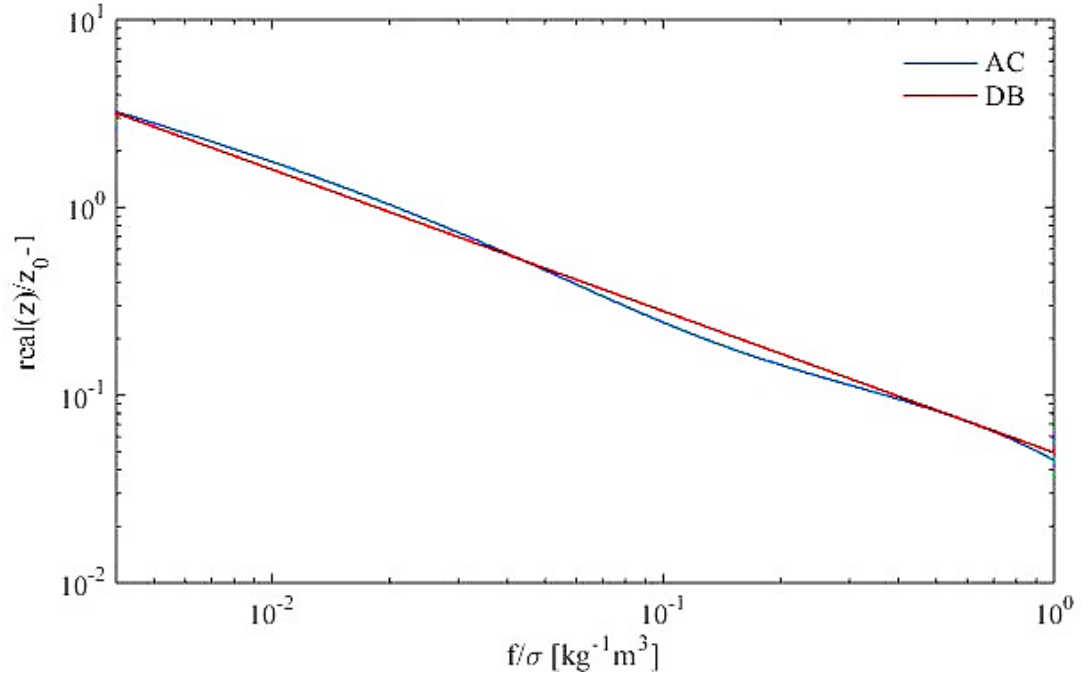


Gráfico 7: Comparação entre a parte imaginária (Z_c) normalizado entre os dois métodos empíricos.

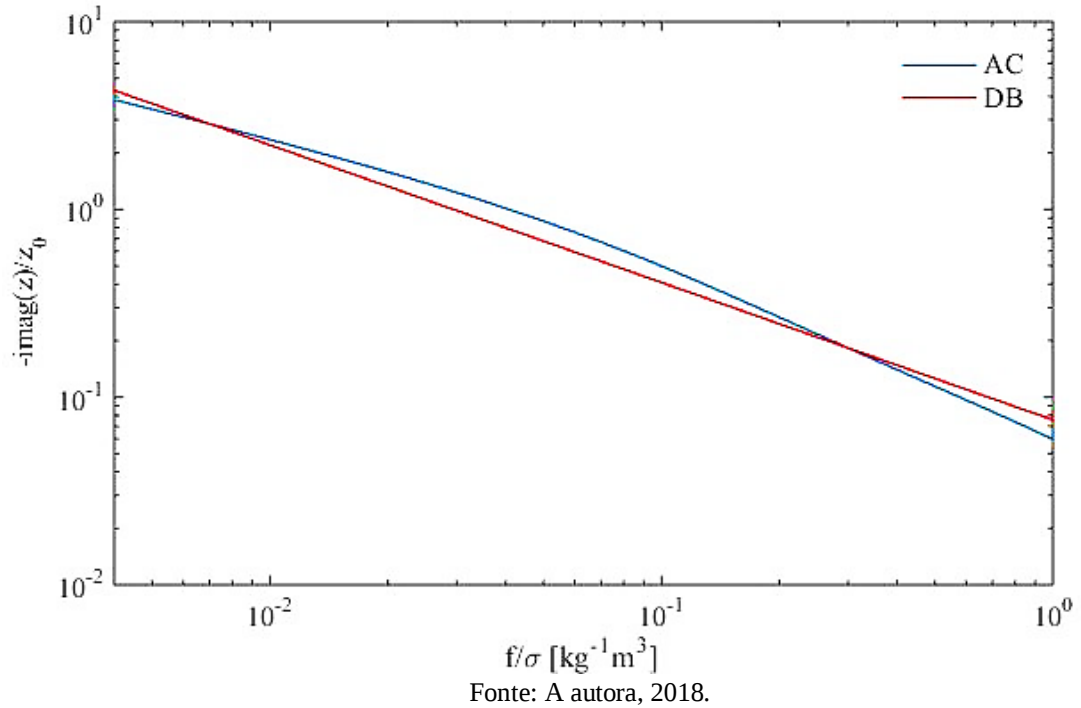
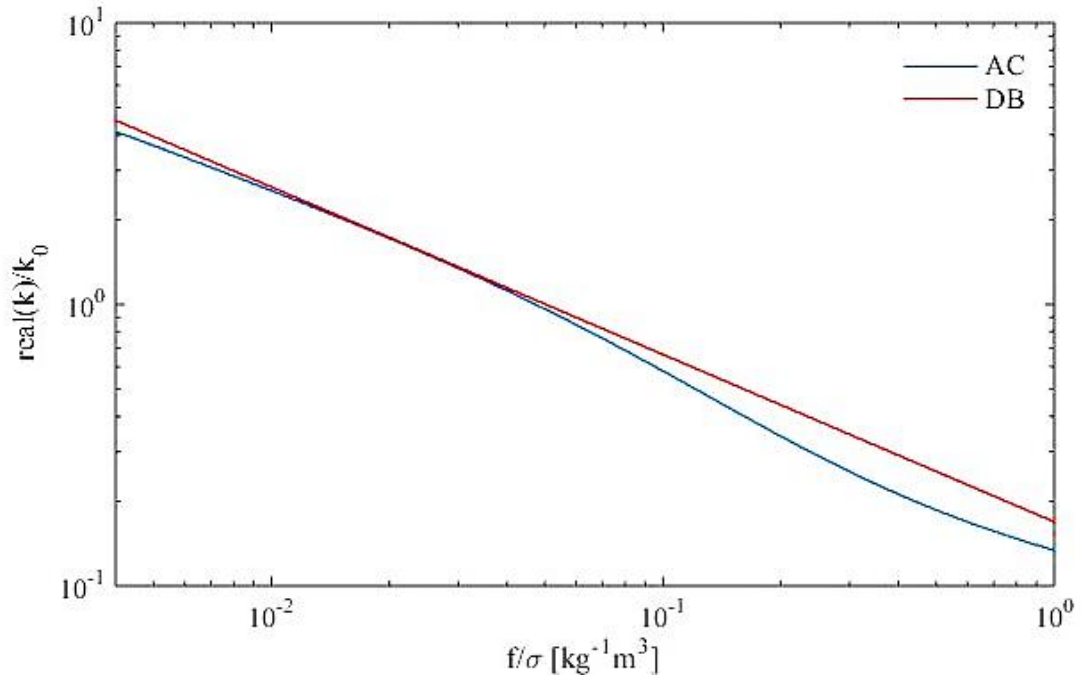
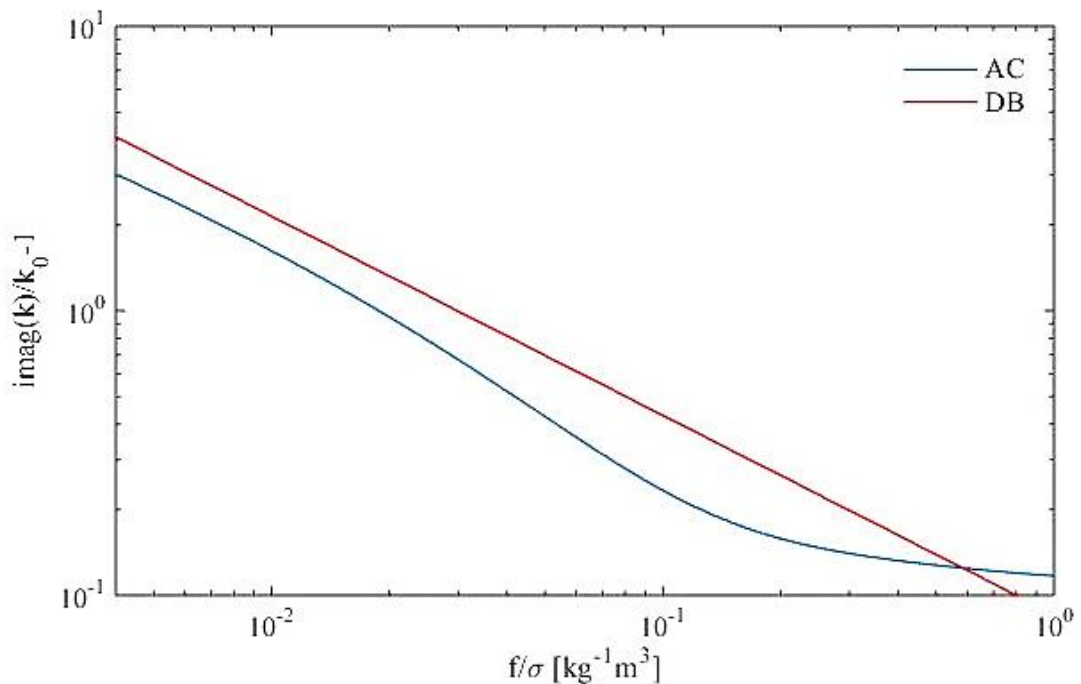


Gráfico 8: Comparação entre a parte real (K_c) normalizado entre os dois métodos empíricos.



Fonte: A autora, 2018.

Gráfico 9: Comparação entre a parte imaginária (K_c) normalizado entre os dois métodos empíricos.

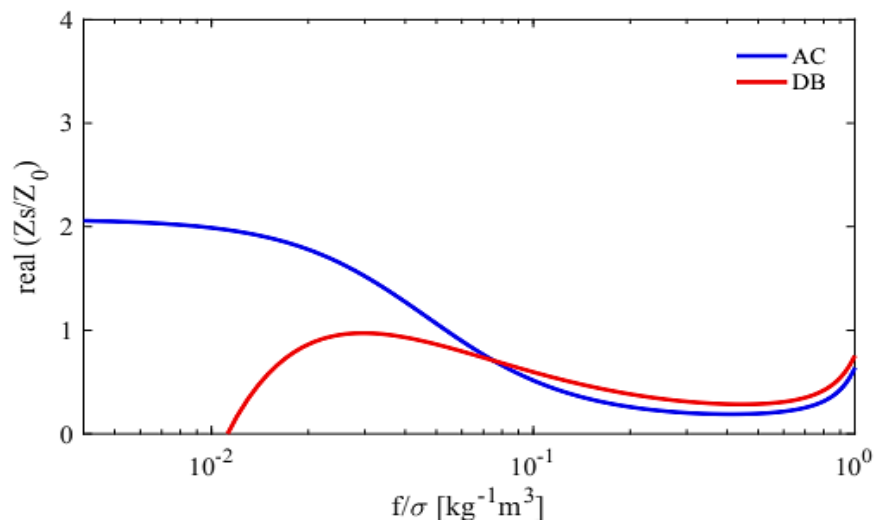


Fonte: A autora, 2018.

Os Gráficos 10 e 11 mostram o comportamento das partes real e imaginária da Impedância de superfície complexa (Z_s) fornecida pelas duas metodologias empíricas. Considerando os dados de $\rho_o = 1,21 \text{ kg/m}^3$, $N_{pr} = 0.712$, $\gamma = 1.4$, $Po = 101,3 \text{ kPa N/m}^2$ para AC

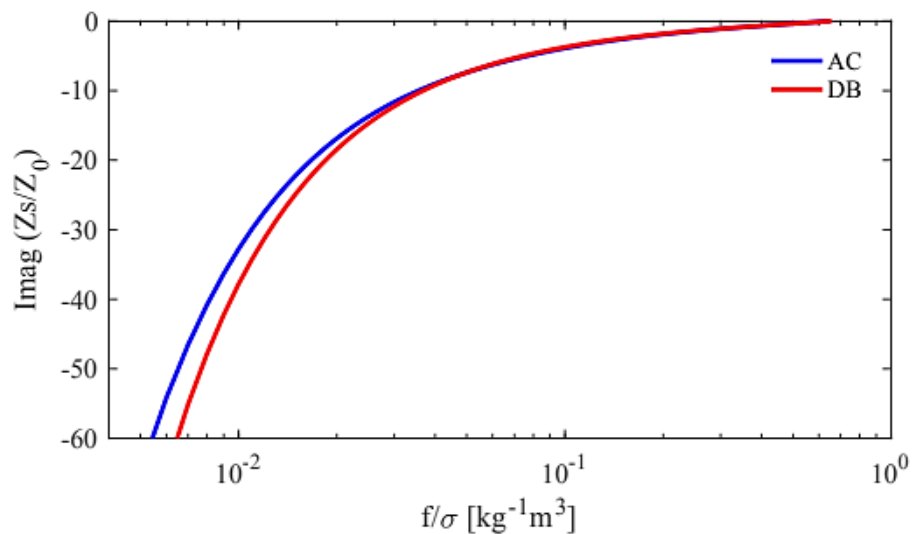
(Allard e Champoux) e $0,004 < f/\sigma < 0,1$ com espessura igual a 24mm para os dados de DB (Delany e Bazley), pode-se observar que as predições de Delany & Bazley conduzem a valores imprecisos para baixas frequências. Em outras palavras, não há significado físico para uma Z_s negativa. Sendo assim, verifica-se que o método de Delany & Bazley somente fornecerá predições corretas para $f/\sigma \geq 0.9$ ou, neste caso, $f \geq 409$ Hz. Este comportamento também foi discutido no trabalho de Allard & Champoux (1991) na apresentação do seu modelo para baixa frequência. Estendendo-se as conclusões deste parágrafo para os demais materiais, pode-se dizer que as avaliações empíricas conduzem a resultados aceitáveis para os limites f/σ apresentados na Tabela 20.

Gráfico 10: Comparação entre a parte real (Z_s) normalizado entre os dois métodos empíricos.



Fonte: A autora, 2018.

Gráfico 11: Comparação entre a parte imaginária (Z_s) normalizado entre os dois métodos empíricos.



Fonte: A autora, 2018.

Tabela 20: Limites inferiores das equações de Delany & Bazley (1970)

Material	f/σ [kg ⁻¹ m ³]	f [Hz]
Coco $\sigma = 4559 \text{ Pa.s/m}^2$	>0.09	>410
Sisal $\sigma = 4180 \text{ Pa.s/m}^2$	>0.09	>376
Cana $\sigma = 6480 \text{ Pa.s/m}^2$	>0.10	>648

Fonte: A autora, 2018.

7.3 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL COM O MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.

O experimento consistiu no uso do tubo de impedância, tal como foi descrito no capítulo 6, com medições do coeficiente de absorções sonora (α) das amostras de fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar com espessura de 5 mm e diâmetro 100 mm combinadas de maneira que foram avaliadas as espessuras de 15, 20 e 30 mm. Não foi realizada a avaliação experimental com combinações menores que 15mm devido ao fato de que os valores de (α) são insignificantes. Os experimentos com amostras de espessuras menores podem ser vistos nas dissertações de mestrado de Terashina (2016) e Legat (2017).

Nas medições, para cada tipo de amostra, seguiram uma sequência de combinações, tal como foi feito no experimento de resistividade ao fluxo, entretanto, com um número menor de amostras combinadas. Foram selecionadas 10 combinações para cada espessura. A Tabela 21 apresenta as combinações utilizadas para todos os materiais e a Tabela 22 mostra as espessuras médias finais alcançadas com as combinações. As combinações foram realizadas com a intercalação entre as amostras de mesma fibra (coco, sisal e cana-de-açúcar), em que:

- Intercalou-se três amostras para alcançar a espessura 15 mm;
- Intercalou-se quatro amostras para alcançar a espessura 20 mm;
- Intercalou-se seis amostras para alcançar a espessura de 30 mm.

Tabela 21: Combinações das amostras com o objetivo de alcançar as espessuras 15 mm, 20 mm e 30 mm.

Amostras	15 mm	20 mm	30 mm
1	1,2,5	1,2,5,9	1,2,3,4,5,8
2	1,3,5	1,3,4,6	1,2,3,6,7,8
3	1,4,6	1,3,5,9	2,3,4,5,6,7
4	1,7,9	1,4,7,9	1,2,4,5,6,10
5	3,4,6	2,3,6,7	1,2,4,6,9,10
6	3,4,7	3,4,6,7	1,2,5,8,9,10
7	3,5,7	4,5,6,8	2,3,5,7,9,10
8	3,6,7	3,4,6,10	2,4,6,8,9,10
9	4,5,6	3,5,7,10	3,4,7,8,9,10
10	4,9,10	4,6,9,10	3,5,7,8,9,10

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 22: Resultado das Médias das combinações das amostras de fibras naturais de espessura de 5 mm.

Amostras	15mm	20mm	30mm
Coco	17,4	22,9	34,6
Sisal	15,8	21,0	31,5
Cana	15,1	20,2	30,0

Fonte: A autora, 2018.

Com base nas dimensões do tubo de impedância ($\varnothing$ 100 mm) e com a distância entre microfones utilizada ($s = 100\text{mm}$), são esperados bons resultados na faixa de frequência compreendida entre f_{min} e f_{max} , equações (126) e (127). A frequência de corte do tubo, ou seja, a máxima frequência que é esperada na propagação de ondas planas no interior do tubo, é dada pela equação (125). Ressalta-se que todas as avaliações foram realizadas com um ruído de banda larga e que as amostras foram colocadas dentro do tubo de impedância e ajustadas de maneira que fiquem as mais próximas possíveis da terminação rígida. A Figura (46) mostra um esquema da montagem do tubo de impedância utilizado nas medições (CHUNG - BLAZER, 1980; MUNJAL, 2013):

$$f_c < \frac{1,84c}{\pi d} \Rightarrow f_c < 2009\text{Hz} \quad (125)$$

$$f_{min} > \frac{0,1c}{2s} \Rightarrow f_{min} < 171,5\text{Hz} \quad (126)$$

$$f_{max} < \frac{0,8c}{2s} \Rightarrow f_{max} < 1372\text{Hz} \quad (127)$$

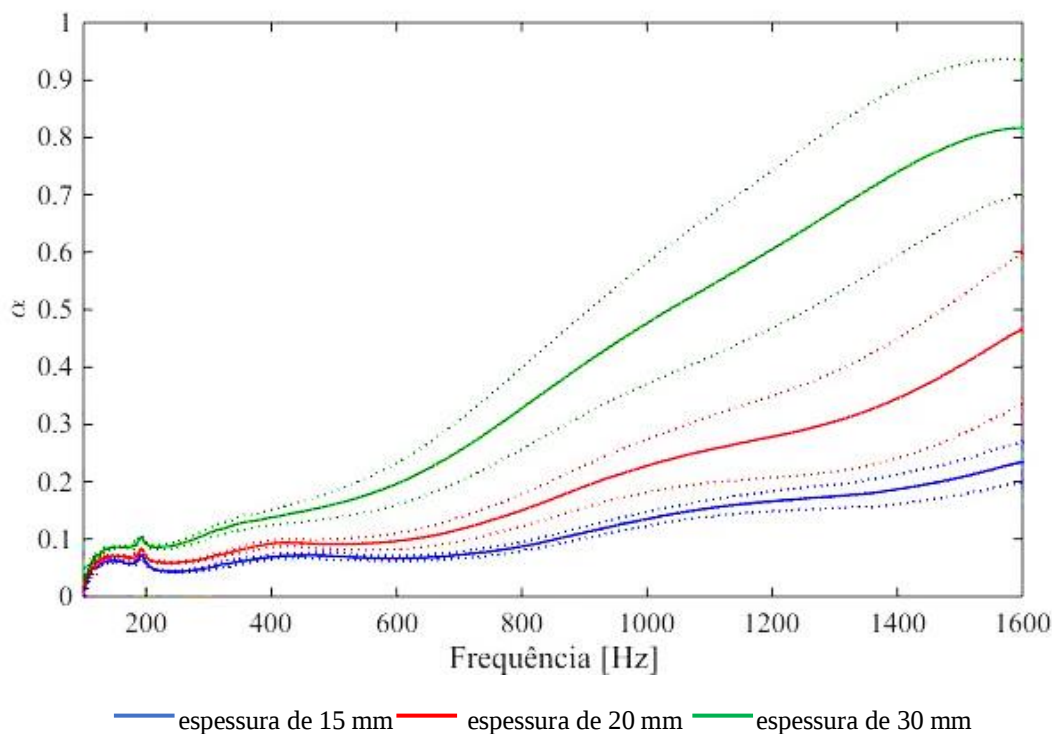
7.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.

Neste trabalho, comparou-se ambos os modelos empíricos de Delany & Bazley (1970) e Allard & Champoux (1991) com o modelo experimental da função de transferência em tubo de impedância, com as amostras de fibras naturais de espessura 5mm, nos diâmetros de 62 mm, 71,5 mm, 80 mm e 89,5 mm. Para o experimento com o tubo de impedância, foram usados os mesmos tipos de fibras, entretanto, as amostras com diâmetro 100 mm. Os Gráficos 12, 13 e 14 apresentam as médias obtidas, em linha contínua, de todos os experimentos e seus respectivos desvios padrões, em linha pontilhada.

O Gráfico 12 faz referência as avaliações experimentais das amostras de fibra de coco, de espessura 5mm e nas combinações de diâmetros 15 mm, 20 mm e 30 mm, no método da função de transferência. A média das amostras de 15 mm, linha em azul, registrou um coeficiente de absorção abaixo de 0,1 nas faixas de frequência de 171,5 Hz a 890 Hz. Nesta linha azul o resultado mais relevante está nas faixas de frequência de 891 Hz a 1372 Hz. A média das amostras de 20mm, linha em vermelha no gráfico, registrou um coeficiente de absorção abaixo de 0,1 nas faixas de frequência de 171,5 Hz a 680 Hz. Entretanto, o resultado mais relevante está nas faixas de frequência de 681Hz a 1372Hz, na linha vermelha. A média das amostras de 30 mm, linha em verde no gráfico, registrou um coeficiente de absorção abaixo de 0,1 nas faixas de frequência de 171,5 Hz a 280 Hz. Contudo, o resultado mais relevante está nas faixas de frequência de 281Hz a 1372Hz, na linha vermelha.

As amostras de 15 mm de espessura obtiveram um comportamento mais constante em comparação as demais espessuras, porém, com resultados mais baixo no eixo y. As amostras de 30 mm de espessura apresentaram o desvio padrão e a média crescente a medida que se aproxima da frequência 1372Hz. Nota-se neste gráfico que, quanto maior a espessura do corpo amostral, maior o desvio padrão.

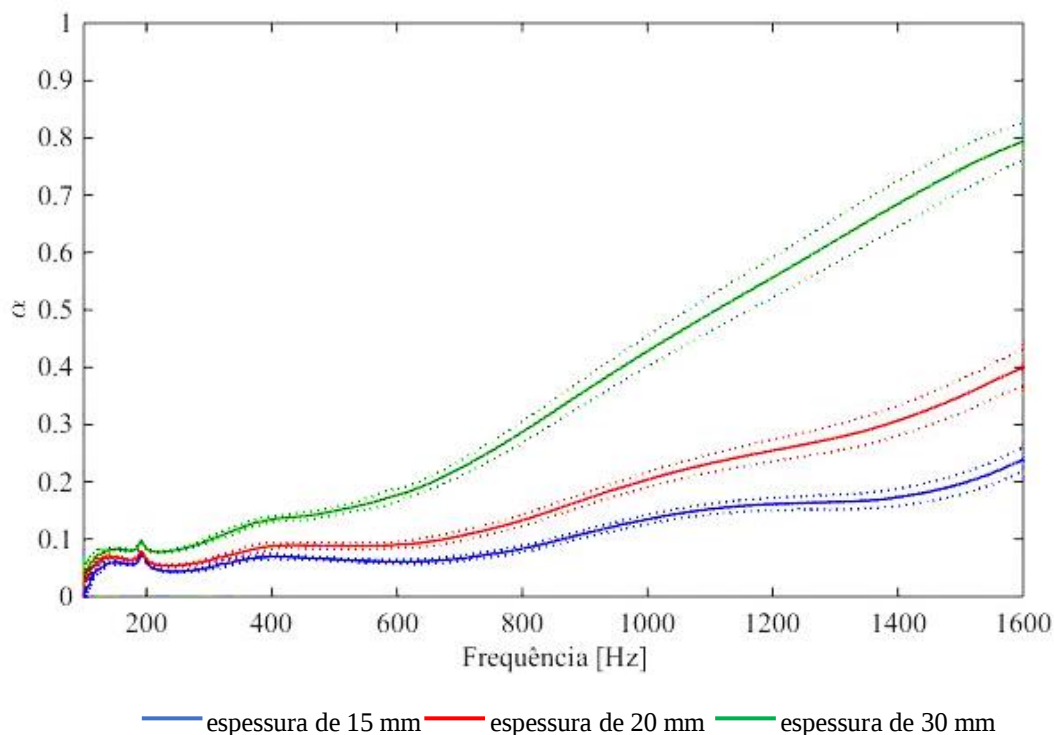
Gráfico 12: Comparativos das medições das amostras fibra de coco no método experimental.



Fonte: A autora, 2018.

O Gráfico 13, faz referência a medições das amostras de fibra de sisal, de espessura 5mm e nas combinações de diâmetros 15 mm, 20 mm e 30 mm, no método da função de transferência. A média das amostras de 15mm, linha em azul no gráfico, registrou um coeficiente de absorção abaixo de 0,1 nas faixas de frequência de 171,5 Hz a 880 Hz; neste caso, o resultado mais relevante está nas faixas de frequência de 881 Hz a 1372 Hz. A média das amostras de 20mm, em linha vermelha no gráfico, registrou um coeficiente de absorção abaixo de 0,1 nas faixas de frequência de 171,5 Hz a 700 Hz. Entretanto, neste caso, o resultado mais relevante está nas faixas de frequência de 701Hz a 1372Hz. A média das amostras de 30 mm, linha em verde no gráfico, registrou um coeficiente de absorção abaixo de 0,1 nas faixas de frequência de 171,5 Hz a 310 Hz. Porém, o resultado mais relevante está nas faixas de frequência de 311Hz a 1372Hz, na linha verde. As amostras de 15 mm de espessura obtiveram um comportamento mais constante em comparação as demais espessuras, porém, as amostras de 30 mm apresentaram a média crescente e o desvio padrão menor em comparação as medições da fibra de coco. Nota-se neste gráfico que quanto, maior a espessura do corpo amostral, o desvio padrão tende a aumentar ao se aproximar das frequências acima de 1000Hz.

Gráfico 13: Comparativos das medições das amostras de fibra de sisal no método experimental.

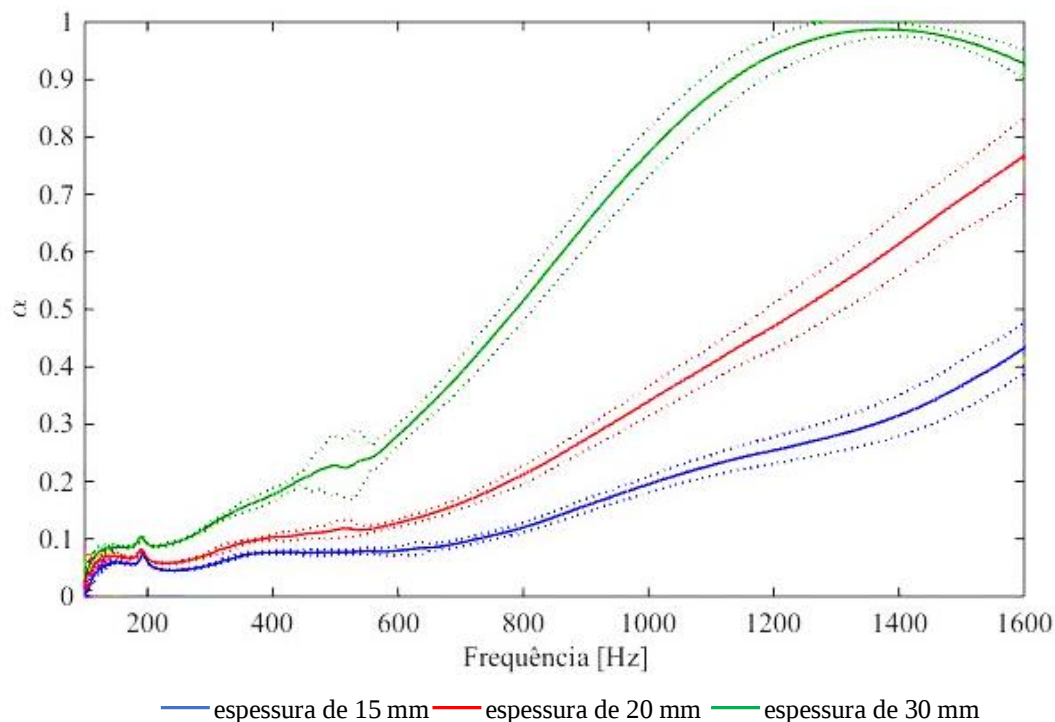


Fonte: A autora, 2018.

O Gráfico 14, faz referência a medições das amostras de fibra de cana-de-açúcar, espessura 5mm e nas combinações de diâmetros 15 mm, 20 mm e 30 mm, no método da função de transferência. A média das amostras de 15mm, linha em azul no gráfico, registrou um coeficiente de absorção abaixo de 0,1 nas faixas de frequência de 171,5 Hz a 800 Hz; neste caso, o resultado mais relevante está nas faixas de frequência de 801 Hz a 1372 Hz. A média das amostras de 20mm, em linha vermelha no gráfico, registrou um coeficiente de absorção abaixo de 0,1 nas faixas de frequência de 171,5 Hz a 400 Hz. Entretanto, o resultado mais relevante ficou nas faixas de frequência de 401Hz a 1372Hz. A média das amostras de 30 mm, linha em verde no gráfico, registrou um coeficiente de absorção abaixo de 0,1 nas faixas de frequência de 171,5 Hz a 250 Hz. Porém, o resultado mais relevante está nas faixas de frequência de 311Hz a 1372Hz, em que houve um aumento gradual, chegando mais próximo de 1 no eixo y. As amostras de 15 mm, 20 mm e 30 mm de espessura obtiveram um comportamento menos constante em comparação as demais fibras, sendo que as amostras de 30 mm de espessura apresentaram a média crescente. O desvio padrão, nas faixas de 450Hz a 550Hz, apresentou uma variação alta, enquanto que nas frequências seguintes o desvio padrão

aumentou de forma gradativa. Nota-se neste gráfico que quanto maior a espessura do corpo amostral, maior o coeficiente de absorção.

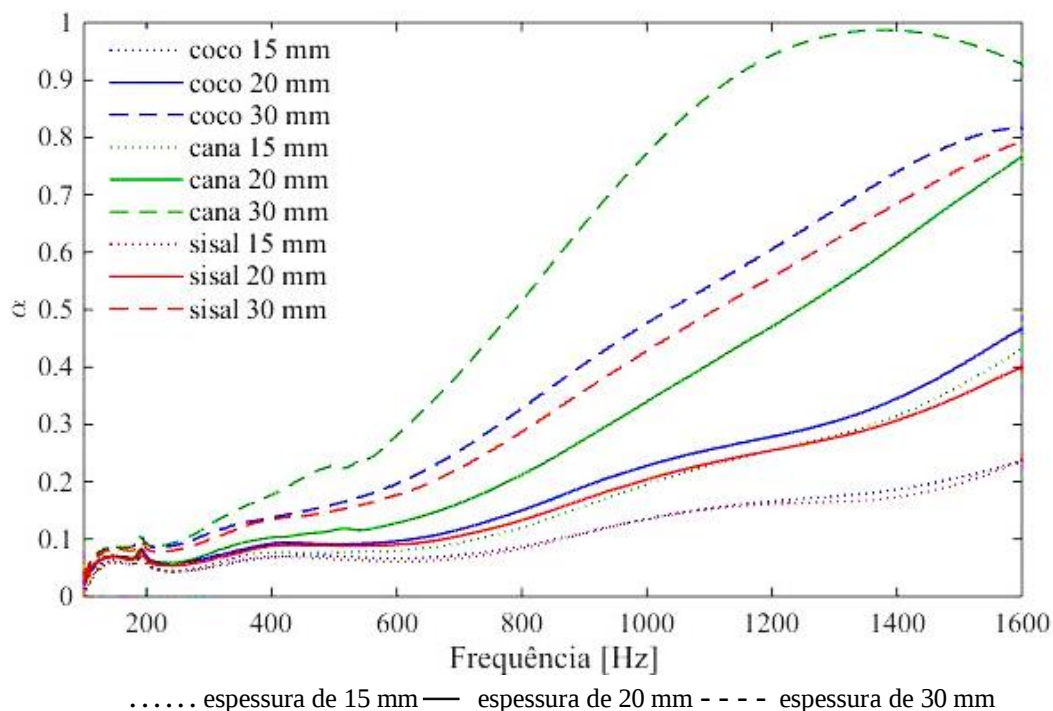
Gráfico 14: Comparativos das medições das amostras de fibra de cana-de-açúcar no método experimental.



Fonte: A autora, 2018.

O Gráfico 15 apresenta a comparação de todos os resultados das medições das amostras de fibras naturais. Neste caso, as medições de cana-de-açúcar se destacaram em todas as espessuras, contudo, em relação as outras amostras. As amostras de 30 mm, de cana de açúcar, foram as que mais se aproximaram do coeficiente de absorção a igual a 1. As amostras de coco e sisal de 30 mm de espessura tiveram um comportamento crescente de acordo com aumento da frequência, em linha tracejada. As amostras de 20 mm de espessura obtiveram resultados mais relevantes para as amostras de cana-de-açúcar, enquanto as amostras de coco e sisal tiveram um comportamento semelhante. Porém, os resultados da fibra de coco de espessura de 20 mm se destacaram em relação as amostras de 20 mm de espessura de fibra de sisal, em linha cheia. As amostras de espessura 5mm, de todas as fibras, apresentaram valores de coeficiente de absorção baixo, chegando até 0,4, no eixo y, em pontilhado.

Gráfico 15: Comparativo das medições de todas as amostras de fibras naturais no método experimental.

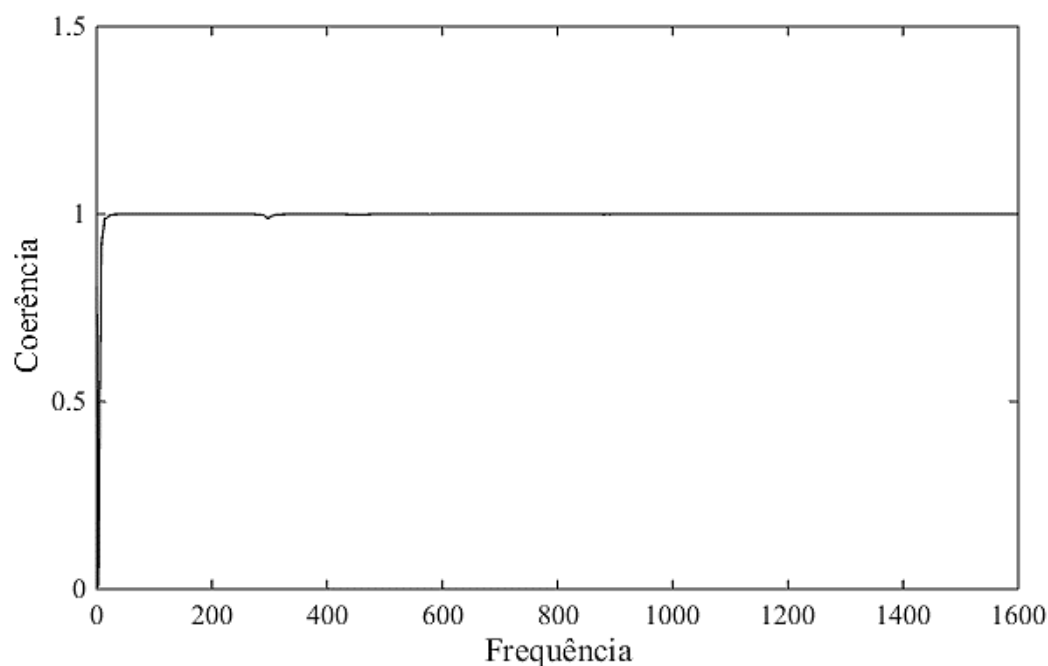


Fonte: A autora, 2018.

Comparando o modelo experimental com os modelos empíricos de Delany & Bazley e Allard & Champoux, com o uso de fibras naturais, para obter o coeficiente de absorção, teremos os seguintes gráficos 16, 17 e 18, em que DB, AC e Exp estão representados como os modelos empíricos de Delany & Bazley (linha tracejada), Allard & Champoux (linha pontilhada) e o modelo Experimental (linha cheia). A cor verde representa amostras de espessura de 15 mm, em cor azul amostras de espessura de 20 mm e em vermelho amostras de espessura 30 mm.

Os Gráficos 12, 13, 14 e 15 apresentaram um pico em todas as medições nas faixas de frequência de 100 a 200 Hz, o que caracteriza que o nó da onda se encontrou neste instante no microfone 1. As coerências neste ponto, para todas as medições de função de transferência, se apresentaram baixa tal como resultado do Gráfico 16.

Gráfico 16: Coerência de todas as medições apresentam as mesmas características.



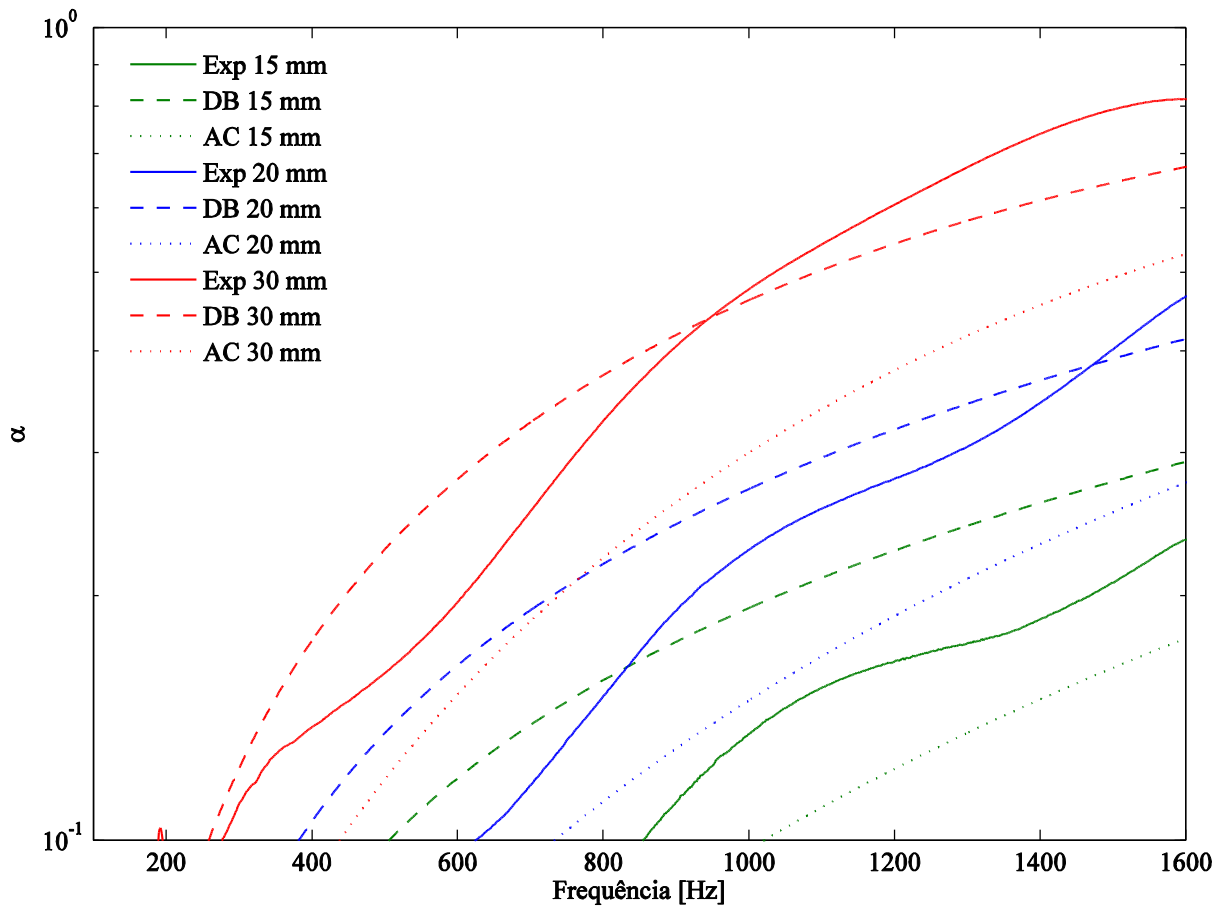
Fonte: A autora, 2018.

Nos Gráficos 17, 18 e 19, com base nos resultados, pode-se afirmar que o modelo matemático de Delany & Bazley (linhas tracejadas) produzem previsões do α para as três espessuras, acima dos valores encontrados na avaliação experimental para as amostras de coco e sisal. Lembra-se aqui que são esperados resultados válidos para a faixa de frequências entre $171,5 < f < 1372$ Hz. Para as espessuras de 15 e 20 mm, o modelo DB apresentou uma previsão maior em todas as frequências válidas. Para as amostras de 30 mm, o modelo de DB apresentou previsão maior até a frequência de 900 Hz. Neste caso, o modelo de DB não é recomendado para frequências baixas com materiais de Resistividade de Fluxo inferior a $\sigma=4559$ pa.s/m².

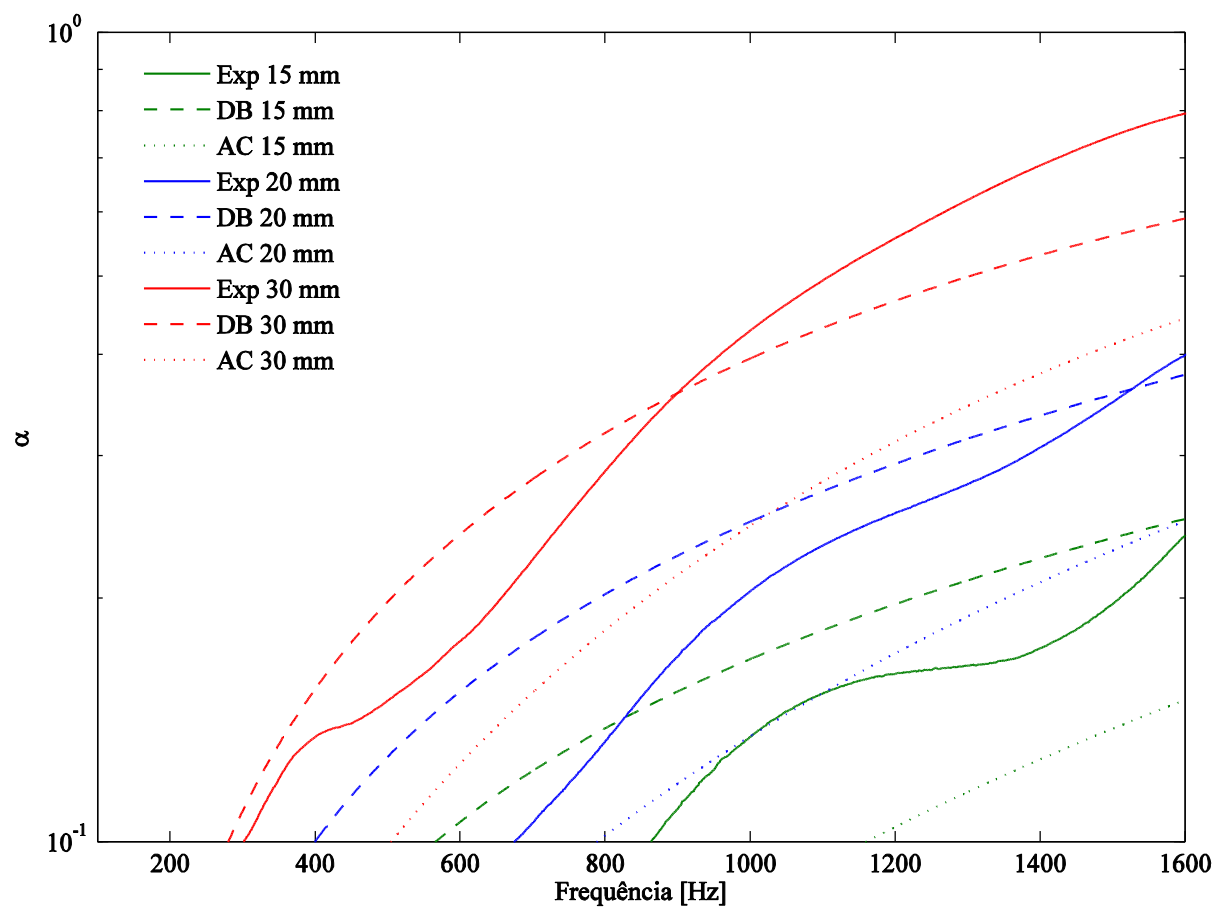
Nos resultados da cana-de-açúcar ($\sigma=6480$ Pa.s/m²), para as amostras de 15 e 20 mm, pode-se dizer que as previsões de DB são aceitáveis para frequências acima de 900 e 750 Hz. Entretanto, para a amostra de 30 mm de espessura, (ver Gráfico 18), as previsões de DB são aceitáveis para toda a faixa de frequência analisada. O modelo de Allard & Champoux - AC (linhas pontilhadas) apresentou previsões mais conservadoras para todas as espessuras e amostras avaliadas. Além disso, para a espessura de 30 mm, o modelo de AC reduziu o valor de α em aproximadamente 30%, conduzindo a valores muito abaixo do real.

Com base nestes resultados, com relação a resistividade fluxo (σ), pode-se afirmar que os valores utilizados por esta dissertação podem melhorar os resultados nos modelos apresentados conforme a espessura do material. Aqui seria recomendado, o estudo de um número maior de amostras e uma faixa maior de resistividades.

Gráfico 17: Comparativo do Coeficiente de absorção sonora (α) do coco: DB x AC x Experimental.

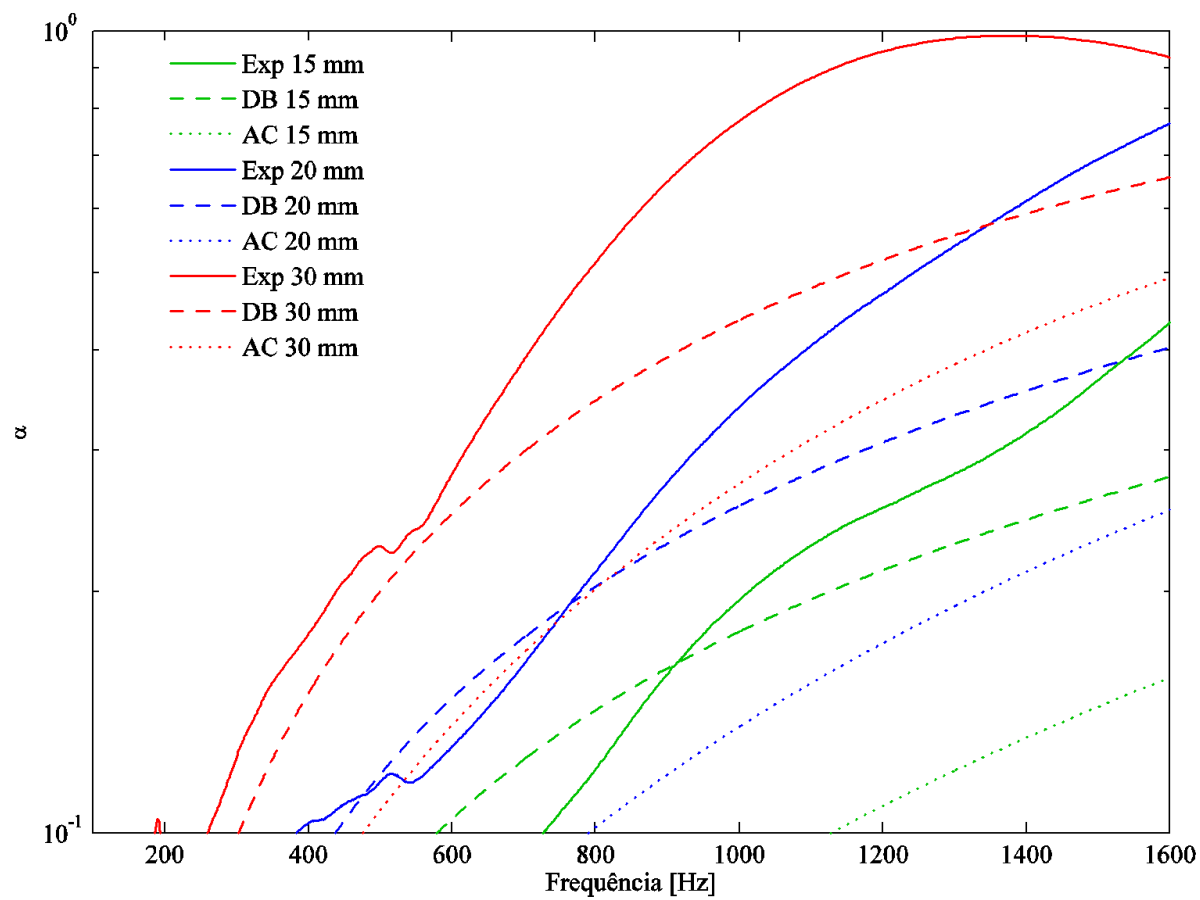


Fonte: A autora, 2018.

Gráfico 18: Comparativo do Coeficiente de absorção sonora (α) para o sisal: DB x AC x Experimental

Fonte: A autora, 2018.

Gráfico 19: Comparativo do Coeficiente de absorção sonora (α) para a cana-de-açúcar: DB x AC x Experimental.



Fonte: A autora, 2018.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÃO

Nesta dissertação foram feitas análises comparativas das fibras naturais, em modelos matemáticos e experimentais para calcular o coeficiente de absorção, com o objetivo de substituir espumas e fibras sintéticas por fibras naturais. Entretanto, houve algumas adversidades do trabalho para encontrar a melhor fibra natural para os experimentos, como o comportamento das fibras no processo de cura e os experimentos de porosidade e tortuosidade por apresentarem erros sistemáticos.

As fibras naturais selecionadas causaram alguns imprevistos no ato da fabricação das amostras, pois cada fibra apresentava um comportamento diferente em relação ao clima, ao aglutinante e ao espalhamento das fibras nos moldes das amostras. De maneira que, em dias úmidos, o tempo de cura da cola junto a fibra, de coco e sisal, era mais longo que o normal, causando um estofamento e um ganho de massa na amostra devido a hidratação da amostra. Outra observação que poderia influenciar no tempo de cura estava relacionada o óleo liberado pelas fibras de coco e sisal, reagindo com a cola, proporcionando um tempo de cura prolongado. Quanto ao espalhamento das fibras nas amostras, foi observado que as amostras não apresentavam um espalhamento igualitário de suas fibras quando misturadas com o aglutinante; isso se deu, pelo fato das amostras serem produzidas de um processo manual e sem o controle da disposição das fibras.

Os métodos experimentais de Porosidade e Tortuosidade, nos quais seriam usadas as amostras, não puderam ser concluídos por apresentar uma sistemática de erros e falhas. O experimento de porosidade passou por três diferentes métodos (porosidade em câmara de ar, porosidade em água e porosidade em vácuo), nos quais foram testados com espumas de polímeros, resultando em altas flutuações e incertezas, gerando dados incertos e respostas dispersivas. Dois dos principais erros do método experimental, na câmara de ar, foram as grandezas físicas de temperatura e pressão que passavam a ter altas flutuações no decorrer de todos os experimentos de porosidade. No experimento de porosidade com água, a principal

falha para não dá continuidade no método foi causado pelas deformidades nas amostras no ato do experimento. O experimento na câmara de vácuo, não teve prosseguimento por não apresentar estrutura ideal para a realização das medições de porosidade, pois a balança não era adequada para as medições em vácuo, o que ocasionada a instabilidade da tara da balança. O experimento de tortuosidade não pode ser concluído, pois o modelo matemático utilizado dependia dos dados de porosidade para gerar resultados. Outra questão a ser mencionada é o fato do método experimental ser executado em meio aquoso, o que acarretaria no desmembramento das amostras de fibras quando analisadas na bancada de tortuosidade.

As análises das amostras aplicadas nos modelos empíricos de Delany & Bazley DB (1970) apresentaram resultados acima dos valores obtidos nas análises experimentais para as amostras de coco e sisal, o que implica em uma predição para o coeficiente de absorção (α) acima do real.

Para amostra de cana-de-açúcar, o modelo empírico de Delany & Bazley (1970) comprovou ser aceitável para amostras de 30 mm de espessura, com resistividade de $\sigma = 6480 \text{ Pa.s/m}^2$, levando a predições muito próximas dos valores obtidos experimentalmente. O modelo empírico de Allard & Champoux (1991), para as amostras demonstra ser válidos, entretanto, assumem valores para o coeficiente (α) muito abaixo dos valores obtidos experimentalmente em toda a faixa de frequência, demonstrando predições muito baixas em comparação com os modelos empírico de Delany & Bazley e o experimental.

As amostras de fibra de cana-de-açúcar, na espessura 30 mm, apresentaram resultados do coeficiente de absorção (α) maiores que as demais fibras, podendo ser considerada a melhor fibra, com relação as densidades avaliadas, para substituir por exemplo: espumas sintéticas utilizadas no tratamento de superfícies acústicas.

Em virtude dos resultados que foram mencionados das propriedades acústicas das amostras de fibras naturais de coco, sisal e cana-de-açúcar e levando-se em consideração a importância da comparação dos resultados dos modelos empíricos de Delany & Bazley e Allard & Champoux e o modelo experimental, pode-se validar o uso da fibra de cana-de-açúcar, de espessura acima de 30 mm, em substituição a espumas sintéticas.

RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para trabalhos futuros podem-se sugerir os seguintes itens:

- Determinar materiais fibrosos com alta Resistividade ao fluxo, em outros métodos experimentais;
- Determinar espessuras acima de 30 mm para análise de coeficiente de absorção nos modelos experimentais;
- Aplicar as fibras naturais na construção civil;
- Aplicar a fibra de cana-de-açúcar em superfície para testes;
- Aplicar a fibra de cana-de-açúcar como difusor acústico;
- Criar peças com fibras naturais, tipo cobogó, para usar como paredes de absorção acústica;

REFERÊNCIAS

ALLARD, J. F.; ATALLA, N., **Modelling sound absorbing materials, second edition**, 9 ed. United Kingdom, 2009.

ALLARD, J. F.; CASTAGNEDE, B.; HENRY, M.; LAURIKS, W., **Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air**. American Institute of Physics, vol. 65, pp. 754-755, 1993.

ALLARD, J. F.; CHAMPOUX, Y., **New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 91, pp. 3346-3353, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM – C 522-03, **Standard test method for airflow resistance of acoustical material**, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM - E 1050-10, **Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system**, 2012.

ARENAS, J. P.; CROCKER, M. J., **Recent trends in porous sound-absorbing materials**, Sound and Vibration, pp. 12-16, 2010.

ATTENBOROUGH, K.; UMNOVA, O.; SHIN, H. C.; CUMMINGS, A., **Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission on thick samples of rigid-porous materials**, Applied Acoustics, vol. 66-2005, pp. 607-624, 2004.

BANSOD, P. V.; MOHANTY, A. R., **Inverse acoustical characterization of natural jute sound absorbing material by the particle swarm optimization method**, Applied Acoustic, vol. 112-2016, pp.41-52, 2016.

BARRON, R. F., **Industrial noise control and acoustics**, 1 ed. Ruston: Marcel Dekker, 2003.

BERANEK, L. L., **Acoustic impedance of porous materials**, J.A.S.A, Cruft Laboratory, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, vol. 13, pp 248-260, 1942.

BIES, D. A.; HANSEN, C. H., **Flow resistance information for acoustical design**, Applied Acoustic, Department of Mechanical Engineering, the University of Adelaide, Sul da Australia, Vol. 13, pp 357-391, 1980.

BIL'OVÁ, M.; LUMNITZER, E., **Acoustical parameters of porous materials and their measurement**, Acta technical corviniensis, vol. 04, pp 39-42, 2011.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2006.

BROWN, R. L.; BOLT, R. L., **The measurement of flow resistance of porous acoustic materials**, The journal, Acoustical society of America, Illinois, pp 332-344, 04-1942.

BODÉN, H. and ABOM, M., **Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 79, pp. 541-549, 1986.

BRANDÃO, Eric., **Acústica de salas: Projeto e modelagem**, São Paulo: Blucher, 2016.

CANLON, B.; THEORELL, T.; HASSON, D., **Associations between stress and hearing problems in humans**, Hearing Research, vol. 295-2013, pp. 9-15, 2012.

CHAMPOUX, Y.; J. F. ALLARD., **Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media**, Journal applied physics, vol. 70-4, pp. 1975-1979, 1991.

CHAMPOUX, Y.; STINSON, M. R.; DAIGLE, G. A., **Air-based system for the measurement of porosity**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 89-2, pp. 910-916, 02-1991.

CHUNG, J. Y.; BLASER, D. A., **Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 68, pp. 907-913, 1980-a.

CHUNG, J. Y.; BLASER, D. A., **Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 68, pp. 914-921, 1980-b.

CHU, W. T., **Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 80, pp. 555-560, 1986.

COSTA, E. C., **Acústica Técnica**, 1 ed. São Paulo: Blucher, 2003.

DELANY, M. E.; BAZLEY, E. N., **Acoustic properties of fibrous absorbent materials**, Applied Acoustics, vol. 3, pp. 105-116, 1970.

DOUTRES, O.; SALISSOU, Y.; ATALLA, N.; PANNETON, R., **Evaluation of the acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube**, vol. 71, pp. 506-509, 2010.

ERSOY, S.; KÜÇÜK, H., **Investigation of industrial tea-leaf-fiber waste material for its sound absorption properties**, Applied Acoustics, vol. 70-2009, pp. 215-220, 2010.

FAHY, F. J., **Rapid method for the measurement of sample acoustic impedance in a standing wave tube**, Journal of Sound and Vibration, vol. 97, pp. 168-170, (1984).

FELLAH, Z. E.; FELLAN, M.; SEBAA, N.; DEPOLLIÉ, C. LAURIKS, W., **Measuring permeability of porous materials at low frequency range via acoustic transmitted waves**, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 119, 2006.

FOULADI, M. H.; NOR, M. J. M.; AYUB, Md.; LEMAN, Z. A., **Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel**, Applied Acoustics, vol. 71-2010, pp. 241-249, 2009.

FOULADI, M. H.; NOR, M. J. M.; AYUB, Md., **Analysis of coir fiber acoustical characteristics**, Applied Acoustics, vol. 72-2011, pp. 35-42, 2010.

FOX, R.W.; MCDONALD, A. T.; PTRITCHARD, P. J., **Introdução à mecânica dos fluidos**, 6ed. Ed. LTC, 2006.

GERGES, S. N. Y., **Ruído – Fundamentos e Controles**, 2ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.

GLÉ, P.; GOURDON, E.; ARNAUD, L., **Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity**, Applied Acoustics, vol. 72-2011, pp. 249-259, 2010.

GROSS, V. A., **Avaliação da porosidade de materiais absorventes utilizados em filtros acústicos dissipativos**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2017.

GROS, E.; PANNETON, R., **A missing mass method to measure the open porosity of porous solids**, Canadian Acoustics, vol. 32, 2004.

JOHNSON, D. L.; KOPLIK, J.; DASHEN, R., **Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media**, Journal Fluid Mechanic, vol. 176, pp. 379-402, 1987.

KINO, N.; UENO, T., **Improvements to the Johnson-Allard model for rigid-framed fibrous materials**, Applied Acoustic, vol. 68, pp. 1468-1484, 2007.

KIRBY, R., **On the modification of Delany and Bazley formulae**, Applied Acoustics, vol. 86, pp. 47-49, 2014.

KIRBY, R.; CUMMINGS, A., **Prediction of the bulk acoustic properties of fibrous materials at low frequencies**, Applied Acoustic, vol. 56, pp. 101-125, 1999.

KOMATSU, T., **Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials**, The acoustical society of Japan. Sci. E Tech, vol. 2, 2008.

LAURIKS, W.; CASTAGNEDE, B.; THOEN, W.; WRIGHT, W.; HUTCHINS, D.; SHINDEL, D., **Determination of the tortuosity of porous materials using new air-coupled ultrasonic transducers**, Symposium Valencia, pp. 11-14, 1994.

LECLAIRE, P.; UMNOVA, O.; HOROSHENKOV, K.V.; MAILLET, L., **Porosity measurement by comparison of air volumes**, Review of Scientific Instruments, vol. 74, pp. 1-5, 2003.

LEGAT, N. L. M. F., **Determinação da impedância acústica e o número de onda de placas finas de fibra de coco com quatro métodos experimentais de avaliação**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2017.

LIU, S.; CHEN, W.; ZHANG, Y., **Design optimization of porous fibrous material for maximizing absorption of sounds under set frequency bands**, Applied Acoustics, vol. 76, pp. 319-328, 2014.

LIMA, K. F., **Alternative method for acoustical characterization of absorbent materials based on the assessment of the acoustical efficiency of dissipative silencers**, Noise control engineering journal, vol. 64, pp. 195- 207, 2016.

MAFRA, M.P.A.; SOEIRO, N. S.; ALVES, E.C., **Determinação e análise comparativa dos coeficientes de absorção de painéis confeccionados a partir de fibra de coco e um painel de uso comercial**, Congresso nacional de estudantes de engenharia mecânica, 2005.

MATTOS, B.; LIMA, K. F., **Avaliação da tortuosidade em materiais absorventes**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2017.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N., **Principio de termodinâmica para engenharia**, 7 ed. Ltc Editora, 2013.

MIKI, Y., **Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany - Bazley models**, Journal Acoustic society of Japan, vol. 11, pp. 19-23, 1990.

MUNJAL, M. L., **Noise and vibration control**, 1 ed. Colorado: IISc Press; Word Scientific, 2013.

PILON, D.; PANNETON, R.; SGARD, F., **Behavioral criterion quantifying the effects of circumferential air gaps on porous materials in the standing wave tube**, Journal Acoustic society of America, pp. 344-356, 2004.

PIMENTEL, V. R., **Construção de uma bancada para a avaliação da resistividade de fluxo de materiais absorventes**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2015.

RAMIS, J.; DEL REY, R.; ALBA, J.; GODINHO, L., **A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber**, Materiales de construcción, vol. 64, 2014.

VÉR, I. L.; BERANEK, L. L., **Noise and vibration control engineering: principles and applications**, John Wiley & Sons, 2 ed, 2006.

VORONINA, N., **An empirical model for rigid-frame porous materials with high porosity-a**, Applied Acoustic, vol. 51, pp. 181-198, 1996.

VORONINA, N., **An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity-b**, Applied Acoustic, vol. 58-1999, pp. 295-304, 1998.

SEBAA, N.; FELLAH, Z. E. A., **Measuring flow resistivity of porous material via acoustic reflected waves**, Journal of applied physics, vol. 98, 2005.

SELAMET, A.; XU, M. B.; LEE, I. J.; HUFF, N. T., **Dissipative expansion chambers with two concentric layers of fibrous materials**, Int. Journal Vehicle Noise Vibration, vol. 1, pp. 341-357, 2005.

SEYBERT, A. F.; SOENARKO, B., **Errors analysis of spectral estimates with application to the measurements of acoustic parameters using random using sound fields in ducts**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 69, pp. 1190-1199, 1981.

SEYBERT, A. F.; ROSS, D. F., **Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 61, pp. 1362-1370, 1977.

TAYLOR, J. R., **An introduction to error analysis**, 2 ed. Colorado: University Science Books, 1997.

TERASHIMA, J. H., **Caracterização das propriedades acústicas de materiais absorventes de pequenas espessuras com três métodos de avaliação**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2017.

WEB REFERÊNCIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA QUÍMICA – **ABIQUIM**. Disponível em: <<https://www.abiquim.org.br/>>. Acesso em 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FIBRAS ARTIFICIAIS E SINTÉTICAS – **ABRAFAS**. Disponível em: <<http://www.abrafas.org.br/>>. Acesso em 2018.

AGENCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA – **AGEITEC**. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/sisal/arvore/CONT000gv5km0x602wx7ha0g934vgxu2mbm1.html>>. Acesso em 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA EM AGROPECUÁRIA - **EMBRAPA**. Disponível em: <www.agencia.cnptia.embrapa.br>. Acesso em 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA EM AGROPECUÁRIA - **EMBRAPA**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_102_22122006154841.html>. Acesso em 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA EM AGROPECUÁRIA - **EMBRAPA**. Disponível em: <http://www.rankbrasil.com.br/Recordes/Materias/06qS/Maior_Produtor_De_Sisal_Do_Mundo>. Acesso em 2018.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO - **FAPESP**. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/1998/04/01/propriedades-do-bagaco-da-cana-de-acucar/>> Acesso em 2017.

HENRIQUE, LUIZ. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/danielmotaba/prof-luiz-henrique-cultivo-do-coqueiro-41059060>>. Acesso em 2016.

LEVANTAMENTO SISTEMÁTICO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA – **LSPA**. Disponível em: <[https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/2017/lspa_201701.pdf](https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/2017/lspa_201701.pdf)>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - **IBGE**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201707_2.shtm>. Acesso em 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - **IBGE**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/pr/pesquisa/15/11863>>. Acesso em 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - **IBGE**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201707_2.shtm>. Acesso em 2017.

MOURA, JOSÉ. I. L.; LEITE, JOSÉ. B. V. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br/radar/coco.htm>> Acesso em 2016.

OLIVEIRA, A. Disponível em: <<http://agnaldocruz.blogspot.com/2012/03/regiao-sisaleira-agoniza.html>>. Acesso em 2018.

PORTAL BRASIL. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/04/safra-2017-2018-de-cana-de-acucar-deve-ser-de-647-milhoes-de-toneladas>>. Acesso em 2017.

RENAUX, P. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/19933-ibge-atualiza-lista-de-produtos-agricolas-e-atende-nova-realidade-do-campo.html>>. Acesso em 2018.

RIOS, H. Disponível em: <<http://www.hamiltonrios.com.br/extracao-do-sisal.php>>. Acesso em 2018.

SILVA, A. M. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/revista/ver-edicao-editorias/?e_id=364>. Acesso em 2017.

SISALL. Disponível em: <<http://www.sisall.com.br/o-sisal/>>. Acesso em 2018.

APÊNDICE A – RESISTIVIDADE AO FLUXO - AMOSTRA FIBRA DE COCO

Tabela 23: Medição em amostras de coco de diâmetros 62,0, 71,5 e 80 mm, respectivamente.

Veloc. [mm/s]	2,3,5,6,7, 9,10	1,3,5,6, 7,9,10	12,5,6,7, 9,10	1,2,3,6,7 ,9,10	1,2,3,5, 7,9,10	1,2,3,5,6, 9,10	1,2,3,5,6, 7,10	12,3,5,6, 7,9	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	3703,70	4558,40	4273,50	4000,00	4558,40	3988,60	4558,40	4558,40	4274,93
15	3798,67	4558,40	4368,47	4190,48	4368,47	3798,67	4558,40	4558,40	4275,00
20	3561,25	4558,40	4273,50	4285,71	4415,95	3846,15	4415,95	4558,40	4239,42
25	3760,68	4558,40	4330,48	4228,57	4444,44	3874,64	4558,40	4558,40	4289,26
30	3798,67	4558,40	4368,47	4285,71	4463,44	3893,64	4558,40	4558,40	4310,64
35	3825,80	4558,40	4395,60	4326,53	4558,40	3988,60	4558,40	4639,80	4356,45
40	3917,38	4629,63	4487,18	4357,14	4629,63	3988,60	4629,63	4700,85	4417,51
45	3925,29	4685,03	4495,09	4444,44	4621,72	4051,92	4685,03	4685,03	4449,19
50	3988,60	4729,34	4501,42	4457,14	4672,36	4045,58	4729,34	4729,34	4481,64

Veloc. [mm/s]	1,3,4,5,6, 7,8	1,2,4,5,6, 7,8	1,2,3,5,6, 7,8	1,2,3,4,6 ,7,8	1,2,3,4,5, 7,8	1,2,3,4,5, 6,8	1,2,3,4,5, 6,7	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	4533,33	4166,67	3645,83	3655,35	3385,42	3645,83	4087,19	3874,23
15	4444,44	4340,28	3645,83	3655,35	3472,22	3819,44	4178,02	3936,51
20	4533,33	4427,08	3776,04	3785,90	3515,63	3906,25	4223,43	4023,95
25	4586,67	4375,00	3854,17	3759,79	3541,67	3854,17	4250,68	4031,73
30	4622,22	4427,08	3906,25	3829,42	3559,03	3906,25	4268,85	4074,16
35	4647,62	4464,29	3869,05	3879,15	3645,83	3943,45	4281,82	4104,46
40	4733,33	4557,29	3906,25	3916,45	3841,15	4036,46	4359,67	4192,94
45	4977,78	4687,50	4166,67	4119,52	3935,19	4224,54	4662,43	4396,23
50	5066,67	4791,67	4218,75	4125,33	3854,17	4218,75	4686,65	4423,14

Veloc. [mm/s]	2,3,4,5,6, 7	1,3,4,5,6, 7	1,2,4,5,6, 7	1,2,3,5,6, 7	1,2,3,4,6, 7	1,2,3,4,5, 7	1,2,3,4,5, 6	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	4699,74	4177,55	5093,83	4533,33	4960,84	5221,93	4699,74	4769,57
15	4699,74	4351,61	4825,74	4444,44	4699,74	5047,87	4873,80	4706,13
20	4699,74	4308,09	4691,69	4400,00	4830,29	5091,38	4830,29	4693,07
25	4804,18	4386,42	5040,21	4586,67	4804,18	5117,49	4908,62	4806,82
30	4786,77	4438,64	5093,83	4533,33	4873,80	5134,90	4873,80	4819,30
35	5147,33	4774,34	5285,33	4952,38	5072,73	5594,93	5147,33	5139,20
40	5091,38	4765,01	5227,88	4866,67	5091,38	5483,03	5026,11	5078,78
45	5105,89	4699,74	5242,78	4859,26	5163,91	5454,02	5047,87	5081,92
50	5065,27	4804,18	5201,07	4960,00	5117,49	5587,47	5117,49	5121,85

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 24: Medição em amostras de coco de diâmetro 89,5 mm.

Veloc. [mm/s]	2,3,4,5,6, 7,10	1,3,4,5,6, 7,10	1,2,4,5,6, 7,10	1,2,3,5,6, 7,10	1,2,3,4,6, 7,10	1,2,3,4,5, 7,10	1,2,3,4,5, 6,10	1,2,3,4,5, 6,7	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	4188,48	4199,48	4473,68	4545,45	4244,03	4450,26	4774,54	5390,84	4533,35
15	4188,48	4374,45	4210,53	4812,83	4244,03	4537,52	4951,37	5390,84	4588,76
20	4319,37	4330,71	4342,11	4812,83	4376,66	4712,04	4907,16	5390,84	4648,96
25	4293,19	4409,45	4315,79	4919,79	4456,23	4712,04	4986,74	5606,47	4712,46
30	4537,52	4549,43	4561,40	5080,21	4686,12	4799,30	5305,04	5570,53	4886,20
35	4562,45	4649,42	4661,65	5194,81	4698,75	4936,42	5380,83	5621,87	4963,28
40	4712,04	4724,41	4802,63	5280,75	4840,85	4973,82	5503,98	5727,76	5070,78
45	4712,04	4841,06	4795,32	5347,59	4892,43	5061,08	5540,82	5870,02	5132,55
50	4816,75	4881,89	4894,74	5401,07	4933,69	5183,25	5623,34	5983,83	5214,82

Fonte: A autora, 2018.

APÊNDICE B – RESISTIVIDADE AO FLUXO - AMOSTRA FIBRA DE SISAL

Tabela 25: Medição em amostras de sisal de diâmetros 62,0, 71,5 e 80 mm, respectivamente.

Veloc. [mm/s]	1,2,3,5,6, 7,8	2,3,5,6,7, 8,9	3,5,6,7,8, 9,1	5,6,7,8,9, 1,2	6,7,8,9,1, 2,3	7,8,9,1,2, 3,5	8,9,1,2,3, 5,6	9,1,2,3,5, 6,7	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	3779,07	3724,93	4069,77	3779,07	4360,47	3768,12	4069,77	3779,07	3916,28
15	3875,97	4011,46	4069,77	4069,77	4069,77	4057,97	4069,77	4069,77	4036,78
20	3924,42	4011,46	4215,12	4069,77	4069,77	4057,97	4215,12	4069,77	4079,17
25	4069,77	4126,07	4302,33	4302,33	4302,33	4173,91	4302,33	4418,60	4249,71
30	4069,77	4202,48	4360,47	4263,57	4263,57	4251,21	4360,47	4263,57	4254,39
35	4152,82	4175,19	4401,99	4318,94	4318,94	4306,42	4401,99	4318,94	4299,40
40	4215,12	4226,36	4505,81	4433,14	4433,14	4347,83	4505,81	4360,47	4378,46
45	4263,57	4329,83	4134,37	4457,36	4457,36	4444,44	4586,56	4457,36	4391,36
50	4418,60	4355,30	4651,16	4534,88	4534,88	4463,77	4593,02	4476,74	4503,55

Veloc. [mm/s]	3,4,5,6,7, 8,9	4,5,6,7,8, 9,10	6,7,8,9,10, 1,3	7,8,9,10, 3,4	8,9,10,1,3, 4,5	9,10,1,3,4, 5,6	10,1,3,4,5, 6,7	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	3746,40	3468,21	3735,63	3179,19	3170,03	3170,03	3478,26	3421,11
15	4226,71	3660,89	3639,85	3468,21	3458,21	3458,21	3671,50	3654,80
20	4322,77	3757,23	3879,31	3757,23	3602,31	3602,31	3768,12	3812,75
25	4380,40	3815,03	3908,05	3699,42	3688,76	3688,76	3826,09	3858,07
30	4514,89	3949,90	3927,20	3853,56	3746,40	3746,40	3864,73	3943,30
35	4528,61	4046,24	4022,99	3881,09	3869,91	3869,91	3975,16	4027,70
40	4610,95	4046,24	4094,83	3973,99	3890,49	3890,49	4057,97	4080,71
45	4803,07	4303,15	4342,27	4174,69	4098,62	4098,62	4122,38	4277,55
50	5014,41	4335,26	4425,29	4277,46	4207,49	4207,49	4347,83	4402,18

Veloc. [mm/s]	1,2,3,4,5, 6,7	2,3,4,5,6, 7,10	3,4,5,6,7, 10,1	4,5,6,7,10, 1,2	5,6,7,10,1, 2,3	6,7,10,1,2, 3,4	7,10,1,2,3, 4,5	10,1,2,3,4, 5,6	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	3954,80	3399,43	3682,72	3682,72	3966,01	4000,00	3703,70	3954,80	3793,02
15	4331,45	3588,29	3966,01	3966,01	4343,72	4380,95	4178,54	4331,45	4135,80
20	4237,29	3824,36	4107,65	3966,01	4390,93	4428,57	4273,50	4378,53	4200,86
25	4406,78	3966,01	4305,95	4192,63	4419,26	4457,14	4330,48	4406,78	4310,63
30	4425,61	3966,01	4249,29	4154,86	4532,58	4571,43	4463,44	4519,77	4360,37
35	4681,19	4289,76	4532,58	4532,58	4775,39	4897,96	4721,20	4923,33	4669,25
40	4731,64	4320,11	4603,40	4603,40	4886,69	4928,57	4700,85	4872,88	4705,94
45	4708,10	4280,77	4658,48	4595,53	4910,29	4952,38	4748,34	4959,20	4726,64
50	4745,76	4362,61	4475,92	4645,89	4815,86	4914,29	4786,32	5028,25	4721,86

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 26: Medição em amostras de sisal de diâmetro 89,5 mm.

Veloc. [mm/s]	2,3,4,5, 6,7,8	3,4,5,6, 7,8,9	4,5,6,7, 8,9,10	5,6,7,8, 9,10,2	6,7,8,9, 10,2,3	7,8,9,10, 2,3,4	8,9,10, 2,3,4,5	9,10,2, 3,4,5,6	10,2,3, 4,5,6,7	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	3418,80	3428,5 7	3714,29	3418,80	3703,70	3418,8 0	3418,8 0	3418,8 0	3418,8 0	3484,3 8
15	3798,67	3619,0 5	4000,00	3418,80	3798,67	3798,6 7	3798,6 7	3608,7 4	3798,6 7	3737,7 7
20	3988,60	3857,1 4	4142,86	3846,15	3988,60	3988,6 0	3988,6 0	3846,1 5	3988,6 0	3959,4 8
25	4102,56	3885,7 1	4228,57	3874,64	4216,52	3988,6 0	3988,6 0	3874,6 4	4102,5 6	4029,1 6
30	4178,54	4095,2 4	4380,95	4368,47	4273,50	4273,5 0	4273,5 0	4083,5 7	4273,5 0	4244,5 3
35	4232,80	4244,9 0	4489,80	4232,80	4477,00	4314,2 0	4314,2 0	4232,8 0	4314,2 0	4316,9 7
40	4344,73	4357,1 4	4571,43	4344,73	4487,18	4487,1 8	4415,9 5	4344,7 3	4487,1 8	4426,6 9
45	4431,78	4380,9 5	4698,41	4368,47	4495,09	4558,4 0	4495,0 9	4368,4 7	4495,0 9	4476,8 6
50	4615,38	4457,1 4	4800,00	4444,44	4672,36	4558,4 0	4615,3 8	4501,4 2	4558,4 0	4580,3 3

Fonte: A autora, 2018.

APÊNDICE C – RES. AO FLUXO – AMOSTRA FIBRA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Tabela 27: Medição em amostras de cana-de-açúcar de diâmetros 62,0, 71,5 e 80,0 mm, respectivamente.

Veloc. [mm/s]	1,2,3,5,6, 8,9	2,3,5,6,8, 9,10	3,5,6,8,9, 10,1	5,6,8,9, 10,1,2	6,8,9,10, 1,2,3	8,9,10,1, 2,3,5	9,10,1,2, 3,5,6	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	6051,87	6340,06	6936,42	6916,43	7514,45	6628,24	6358,38	6677,98
15	6147,93	6532,18	7129,09	7108,55	7514,45	6724,30	6358,38	6787,84
20	6195,97	6628,24	7225,43	7204,61	7658,96	6772,33	6502,89	6884,06
25	6340,06	6801,15	7514,45	7492,80	7861,27	6916,43	6705,20	7090,19
30	6436,12	6820,37	7514,45	7492,80	7803,47	6916,43	6743,74	7103,91
35	6587,07	7081,10	7679,60	7657,47	8092,49	7081,10	6853,84	7290,38
40	6700,29	7204,61	7875,72	7853,03	8236,99	7276,66	7008,67	7450,85
45	6852,39	7300,67	7899,81	7941,08	8413,62	7300,67	7193,32	7557,37
50	6916,43	7435,16	8034,68	8069,16	8497,11	7492,80	7283,24	7675,51

Veloc. [mm/s]	1,2,3,4, 6,7,8	2,3,4,6, 7,8,10	3,4,6,7, 8,10,1	4,6,7,8, 10,1,2	6,7,8,10, 1,2,3	7,8,10,1, 2,3,4	8,10,1,2, 3,4,6	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	5698,01	5413,11	5128,21	4843,30	5413,11	5413,11	5142,86	5293,10
15	5887,94	5508,07	5318,14	5128,21	5508,07	5698,01	5333,33	5483,11
20	5982,91	5698,01	5698,01	5128,21	5698,01	5840,46	5571,43	5659,57
25	6153,85	5811,97	5698,01	5128,21	5698,01	5925,93	5714,29	5732,89
30	6267,81	5982,91	5887,94	5318,14	5982,91	6077,87	5809,52	5903,87
35	6430,61	6105,01	5942,21	5453,81	6105,01	6186,41	5959,18	6026,03
40	5911,68	6054,13	6339,03	6196,58	5626,78	6125,36	6285,71	6077,04
45	6837,61	6584,36	6457,74	5318,14	6521,05	6774,30	6412,70	6415,13
50	6837,61	6780,63	6666,67	6153,85	6666,67	7008,55	6571,43	6669,34

Veloc. [mm/s]	1,2,3,6, 7,8,9	2,3,6,7, 8,9,10	3,6,7,8, 9,10,1	6,7,8,9, 10,1,2	7,8,9,10, 1,2,3	8,9,10, 1,2,3,6	9,10,1, 2,3,6,7	Média
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	5128,21	3910,61	4469,27	4761,90	5084,75	5027,93	5322,13	4814,97
15	5318,14	4283,05	4841,71	5042,02	5649,72	5214,15	5602,24	5135,86
20	5270,66	4469,27	5027,93	5182,07	5508,47	5446,93	5742,30	5235,38
25	5811,97	4581,01	5251,40	5378,15	5762,71	5586,59	5826,33	5456,88
30	5887,94	4748,60	5400,37	5508,87	5932,20	5679,70	6069,09	5603,83
35	6267,81	5107,74	5666,40	5922,37	6295,40	6225,06	6402,56	5983,91
40	6125,36	5307,26	5796,09	6092,44	6497,18	6215,08	6512,61	6078,00
45	6204,50	5276,23	5959,03	6224,71	6591,34	6331,47	6535,95	6160,46
50	6324,79	5418,99	5921,79	6274,51	6666,67	6480,45	6722,69	6258,55

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 28: Medição em amostras de cana-de-açúcar de diâmetro 89,5 mm.

Veloc. [mm/s]	2,3,5,6, 7,8,9	3,5,6,7, 8,9,1	5,6,7,8, 9,1,2	6,7,8,9, 1,2,3	7,8,9,1, 2,3,5	9,1,2,3, 5,6,7	Média
5	-	-	-	-	-	-	-
10	5649,72	5898,88	6179,78	6197,18	6232,29	5898,88	6009,45
15	5838,04	6179,78	6554,31	6572,77	6421,15	6179,78	6290,97
20	6073,45	6460,67	6741,57	6760,56	6657,22	6460,67	6525,69
25	6214,69	6629,21	6966,29	6873,24	6798,87	6629,21	6685,25
30	6779,66	6928,84	7490,64	7230,05	7365,44	7022,47	7136,18
35	6941,08	7142,86	7544,14	7323,94	7365,44	7223,11	7256,76
40	7203,39	7373,60	7865,17	7464,79	7719,55	7514,04	7523,42
45	7281,86	7553,06	7990,01	7824,73	7869,06	7740,32	7709,84
50	7627,12	7865,17	8202,25	8112,68	8158,64	7921,35	7981,20

Fonte: A autora, 2018.

APÊNDICE D – VARIAÇÃO DE PRESSÃO ΔP (0,1 – 250,0 [Pa]), AMOSTRAS DE COCO

Tabela 29:Variação de pressão nas amostras de coco, diâmetros 62,0, 71,5 e 80,0 mm.

Veloc. [mm/s]	2,3,5,6,7, 9,10	1,3,5,6,7, 9,10	12,5,6,7, 9,10	1,2,3,6,7, 9,10	1,2,3,5,7, 9,10	1,2,3,5,6, 9,10	1,2,3,5,6, 7,10	12,3,5,6, 7,9
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1,3	1,6	1,5	1,4	1,6	1,4	1,6	1,6
15	2	2,4	2,3	2,2	2,3	2	2,4	2,4
20	2,5	3,2	3	3	3,1	2,7	3,1	3,2
25	3,3	4	3,8	3,7	3,9	3,4	4	4
30	4	4,8	4,6	4,5	4,7	4,1	4,8	4,8
35	4,7	5,6	5,4	5,3	5,6	4,9	5,6	5,7
40	5,5	6,5	6,3	6,1	6,5	5,6	6,5	6,6
45	6,2	7,4	7,1	7	7,3	6,4	7,4	7,4
50	7	8,3	7,9	7,8	8,2	7,1	8,3	8,3

Veloc. [mm/s]	1,3,4,5,6, 7,8	1,2,4,5,6, 7,8	1,2,3,5,6, 7,8	1,2,3,4,6, 7,8	1,2,3,4,5, 7,8	1,2,3,4,5, 6,8	1,2,3,4,5, 6,7
5	-	-	-	-	-	-	-
10	1,7	1,6	1,4	1,4	1,3	1,4	1,5
15	2,5	2,5	2,1	2,1	2	2,2	2,3
20	3,4	3,4	2,9	2,9	2,7	3	3,1
25	4,3	4,2	3,7	3,6	3,4	3,7	3,9
30	5,2	5,1	4,5	4,4	4,1	4,5	4,7
35	6,1	6	5,2	5,2	4,9	5,3	5,5
40	7,1	7	6	6	5,9	6,2	6,4
45	8,4	8,1	7,2	7,1	6,8	7,3	7,7
50	9,5	9,2	8,1	7,9	7,4	8,1	8,6

Veloc. [mm/s]	2,3,4,5, 6,7	1,3,4,5, 6,7	1,2,4,5, 6,7	1,2,3,5, 6,7	1,2,3,4, 6,7	1,2,3,4, 5,7	1,2,3,4, 5,6
5	-	-	-	-	-	-	-
10	1,8	1,6	1,9	1,7	1,9	2	1,8
15	2,7	2,5	2,7	2,5	2,7	2,9	2,8
20	3,6	3,3	3,5	3,3	3,7	3,9	3,7
25	4,6	4,2	4,7	4,3	4,6	4,9	4,7
30	5,5	5,1	5,7	5,1	5,6	5,9	5,6
35	6,9	6,4	6,9	6,5	6,8	7,5	6,9
40	7,8	7,3	7,8	7,3	7,8	8,4	7,7
45	8,8	8,1	8,8	8,2	8,9	9,4	8,7
50	9,7	9,2	9,7	9,3	9,8	10,7	9,8

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 30: Variação de pressão nas amostras de coco, diâmetro 89,5 mm.

Veloc. [mm/s]	2,3,4,5,6, 7,10	1,3,4,5,6, 7,10	1,2,4,5,6, 7,10	1,2,3,5,6, 7,10	1,2,3,4,6, 7,10	1,2,3,4,5, 7,10	1,2,3,4,5, 6,10	1,2,3,4,5, 6,7
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1,6	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7	1,8	2
15	2,4	2,5	2,4	2,7	2,4	2,6	2,8	3
20	3,3	3,3	3,3	3,6	3,3	3,6	3,7	4
25	4,1	4,2	4,1	4,6	4,2	4,5	4,7	5,2
30	5,2	5,2	5,2	5,7	5,3	5,5	6	6,2
35	6,1	6,2	6,2	6,8	6,2	6,6	7,1	7,3
40	7,2	7,2	7,3	7,9	7,3	7,6	8,3	8,5
45	8,1	8,3	8,2	9	8,3	8,7	9,4	9,8
50	9,2	9,3	9,3	10,1	9,3	9,9	10,6	11,1

Fonte: A autora, 2018.

APÊNDICE E – VARIAÇÃO DE PRESSÃO ΔP (0,1 – 250,0 [Pa]), AMOSTRAS DE SISAL

Tabela 31:Variação de pressão nas amostras de sisal, diâmetros 62,0, 71,5 e 80,0 mm.

Veloc. [mm/s]	1,2,3,5,6, 7,8	2,3,5,6,7, 8,9	3,5,6,7,8, 9,1	5,6,7,8,9, 1,2	6,7,8,9,1, 2,3	7,8,9,1,2, 3,5	8,9,1,2,3, 5,6	9,1,2,3,5, 6,7
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1,3	1,3	1,4	1,3	1,5	1,3	1,4	1,3
15	2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
20	2,7	2,8	2,9	2,8	2,8	2,8	2,9	2,8
25	3,5	3,6	3,7	3,7	3,7	3,6	3,7	3,8
30	4,2	4,4	4,5	4,4	4,4	4,4	4,5	4,4
35	5	5,1	5,3	5,2	5,2	5,2	5,3	5,2
40	5,8	5,9	6,2	6,1	6,1	6	6,2	6
45	6,6	6,8	6,4	6,9	6,9	6,9	7,1	6,9
50	7,6	7,6	8	7,8	7,8	7,7	7,9	7,7

Veloc. [mm/s]	1,3,4,5, 6,7,8	3,4,5,6, 7,8,9	4,5,6,7, 8,9,10	5,6,7,8, 9,10,1	6,7,8,9, 10,1,3	7,8,9, 10,3,4	8,9,10,1, 3,4,5	9,10,1,3, 4,5,6	10,1,3,4, 5,6,7
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1,3	1,3	1,2	1,1	1,3	1,1	1,1	1,1	1,2
15	2	2,2	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9
20	2,8	3	2,6	2,6	2,7	2,6	2,5	2,5	2,6
25	3,5	3,8	3,3	3,3	3,4	3,2	3,2	3,2	3,3
30	4,2	4,7	4,1	4,1	4,1	4,0	3,9	3,9	4,0
35	5,1	5,5	4,9	4,8	4,9	4,7	4,7	4,7	4,8
40	5,9	6,4	5,6	5,6	5,7	5,5	5,4	5,4	5,6
45	6,9	7,5	6,7	6,8	6,8	6,5	6,4	6,4	6,4
50	7,8	8,7	7,5	7,6	7,7	7,4	7,3	7,3	7,5

Veloc. [mm/s]	1,2,3,4, 5,6,7	2,3,4,5, 6,7,10	3,4,5,6, 7,10,1	4,5,6,7, 10,1,2	5,6,7,10, 1,2,3	6,7,10,1, 2,3,4	7,10,1,2, 3,4,5	10,1,2,3, 4,5,6
5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1,4	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,4
15	2,3	1,9	2,1	2,1	2,3	2,3	2,2	2,3
20	3	2,7	2,9	2,8	3,1	3,1	3	3,1
25	3,9	3,5	3,8	3,7	3,9	3,9	3,8	3,9
30	4,7	4,2	4,5	4,4	4,8	4,8	4,7	4,8
35	5,8	5,3	5,6	5,6	5,9	6	5,8	6,1
40	6,7	6,1	6,5	6,5	6,9	6,9	6,6	6,9
45	7,5	6,8	7,4	7,3	7,8	7,8	7,5	7,9
50	8,4	7,7	7,9	8,2	8,5	8,6	8,4	8,9

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 32: Variação de pressão nas amostras de sisal, diâmetro 89,5 mm.

Veloc. [mm/s]	2,3,4, 5,6,7,8	3,4,5, 6,7,8,9	4,5,6,7, 8,9,10	5,6,7,8, 9,10,2	6,7,8,9, 10,2,3	7,8,9,10, 2,3,4	8,9,10,2, 3,4,5	9,10,2,3, 4,5,6	10,2,3,4, 5,6,7
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1,2	1,2	1,3	1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
15	2	1,9	2,1	1,8	2	2	2	1,9	2
20	2,8	2,7	2,9	2,7	2,8	2,8	2,8	2,7	2,8
25	3,6	3,4	3,7	3,4	3,7	3,5	3,5	3,4	3,6
30	4,4	4,3	4,6	4,6	4,5	4,5	4,5	4,3	4,5
35	5,2	5,2	5,5	5,2	5,5	5,3	5,3	5,2	5,3
40	6,1	6,1	6,4	6,1	6,3	6,3	6,2	6,1	6,3
45	7	6,9	7,4	6,9	7,1	7,2	7,1	6,9	7,1
50	8,1	7,8	8,4	7,8	8,2	8	8,1	7,9	8

Fonte: A autora, 2018.

APÊNDICE F – VARIAÇÃO DE PRESSÃO ΔP (0,1 – 250,0 [Pa]), AMOSTRAS CANA-DE-AÇÚCAR

Tabela 33: Variação de pressão nas amostras de cana-de-açúcar, diâmetros 62,0, 71,5 e 80,0 mm.

Veloc. [mm/s]	1,2,3,5, 6,8,9	2,3,5,6, 8,9,10	3,5,6,8, 9,10,1	5,6,8,9, 10,1,2	6,8,9,10, 1,2,3	8,9,10,1, 2,3,5	9,10,1,2, 3,5,6
5	-	-	-	-	-	-	-
10	2,1	2,2	2,4	2,4	2,6	2,3	2,2
15	3,2	3,4	3,7	3,7	3,9	3,5	3,3
20	4,3	4,6	5	5	5,3	4,7	4,5
25	5,5	5,9	6,5	6,5	6,8	6	5,8
30	6,7	7,1	7,8	7,8	8,1	7,2	7
35	8	8,6	9,3	9,3	9,8	8,6	8,3
40	9,3	10	10,9	10,9	11,4	10,1	9,7
45	10,7	11,4	12,3	12,4	13,1	11,4	11,2
50	12	12,9	13,9	14	14,7	13	12,6

Veloc. [mm/s]	1,2,3,4, 6,7,8	2,3,4,6, 7,8,10	3,4,6,7, 8,10,1	4,6,7,8, 10,1,2	6,7,8,10, 1,2,3	7,8,10,1, 2,3,4	8,10,1,2, 3,4,6
5	-	-	-	-	-	-	-
10	2	1,9	1,8	1,7	1,9	1,9	1,8
15	3,1	2,9	2,8	2,7	2,9	3	2,8
20	4,2	4	4	3,6	4	4,1	3,9
25	5,4	5,1	5	4,5	5	5,2	5
30	6,6	6,3	6,2	5,6	6,3	6,4	6,1
35	7,9	7,5	7,3	6,7	7,5	7,6	7,3
40	8,3	8,5	8,9	8,7	7,9	8,6	8,8
45	10,8	10,4	10,2	8,4	10,3	10,7	10,1
50	12	11,9	11,7	10,8	11,7	12,3	11,5

Veloc. [mm/s]	1,2,3,6, 7,8,9	2,3,6,7, 8,9,10	3,6,7,8, 9,10,1	6,7,8,9, 10,1,2	7,8,9,10, 1,2,3	8,9,10,1, 2,3,6	9,10,1,2, 3,6,7
5	-	-	-	-	-	-	-
10	1,8	1,4	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9
15	2,8	2,3	2,6	2,7	3	2,8	3
20	3,7	3,2	3,6	3,7	3,9	3,9	4,1
25	5,1	4,1	4,7	4,8	5,1	5	5,2
30	6,2	5,1	5,8	5,9	6,3	6,1	6,5
35	7,7	6,4	7,1	7,4	7,8	7,8	8
40	8,6	7,6	8,3	8,7	9,2	8,9	9,3
45	9,8	8,5	9,6	10	10,5	10,2	10,5
50	11,1	9,7	10,6	11,2	11,8	11,6	12

Fonte: A autora, 2018.

Tabela 34: Variação de pressão nas amostras de cana-de-açúcar, diâmetro 89,5 mm.

Veloc. [mm/s]	2,3,5,6,7,8,9	3,5,6,7,8,9,1	5,6,7,8,9,1,2	6,7,8,9,1,2,3	7,8,9,1,2,3,5	9,1,2,3,5,6,7
5	-	-	-	-	-	-
10	2	2,1	2,2	2,2	2,2	2,1
15	3,1	3,3	3,5	3,5	3,4	3,3
20	4,3	4,6	4,8	4,8	4,7	4,6
25	5,5	5,9	6,2	6,1	6	5,9
30	7,2	7,4	8	7,7	7,8	7,5
35	8,6	8,9	9,4	9,1	9,1	9
40	10,2	10,5	11,2	10,6	10,9	10,7
45	11,6	12,1	12,8	12,5	12,5	12,4
50	13,5	14	14,6	14,4	14,4	14,1

Fonte: A autora, 2018.