

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

Escola Politécnica

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-
PPGEM**

MARCO VINICIUS TOMEN ZESCHOTKO

**AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE MATERIAIS
COMPÓSITOS DE FIBRAS NATURAIS E POLÍMEROS**

CURITIBA

Julho - 2023

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

Escola Politécnica

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-
PPGEM**

MARCO VINICIUS TOMEN ZESCHOTKO

**AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE MATERIAIS
COMPÓSITOS DE FIBRAS NATURAIS E POLÍMEROS**

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, Dr.

CURITIBA

Julho - 2023

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Luci Eduarda Wielganczuk – CRB 9/1118

Zeschotko, Marco Vinicius Tomen

Z59a Avaliação do coeficiente de absorção sonora de materiais compósitos de
2023 fibras naturais e polímeros / Marco Vinicius Tomen Zeschotko ; orientador: Key
Fonseca de Lima. – 2023.

131 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
Curitiba, 2023

Bibliografia: f. 84-88

1. Engenharia mecânica. 2. Coeficiente de absorção sonora. 3. Absorção
sonora. 4. Fibras naturais. 5. Polímeros. I. Lima, Key Fonseca de. II. Pontifícia
Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em
em Engenharia Mecânica. III. Título.

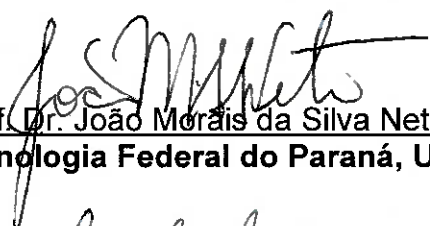
CDD 20. ed. – 620.1

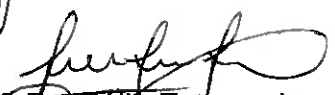
TERMO DE APROVAÇÃO

Marco Vinícius Tomen Zeschotko

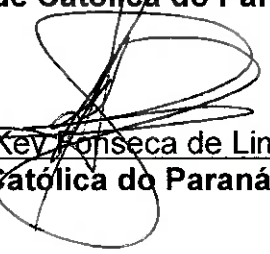
Avaliação do Coeficiente de Absorção Sonora de Compósitos Formados por Fibras Naturais e Polímeros Provenientes de Resíduos Industriais em Baixa Frequência

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, perante uma banca examinadora composta pelos seguintes membros:


Prof. Dr. João Morais da Silva Neto
Universidade Tecnologia Federal do Paraná, UFPR, Relator


Prof. Dr. Hélio Emmendoerfer Junior
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR


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


Prof. Dr. Key Fonseca de Lima
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR, orientador

Curitiba, 28 de novembro de 2023

AGRADECIMENTOS

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

Agradeço imensamente aos meus pais, que sempre foram meu maior suporte, oferecendo apoio incondicional em todos os meus sonhos. Com dedicação e esforço, eles sempre se empenharam ao máximo para garantir que nada me faltasse ao longo de toda a minha jornada.

Agradeço à minha irmã, com quem compartilho risadas inesquecíveis e momentos descontraídos. Sempre que a pressão do trabalho se tornava intensa, ela estava lá para sairmos juntos, proporcionando-me momentos de relaxamento e alívio do estresse.

Expresso minha profunda gratidão à minha noiva Nerhyssa, uma fonte constante de apoio e estímulo em minha jornada para realizar o sonho de me tornar um educador. O fato de ela também estar ingressando no meio acadêmico torna a nossa trajetória ainda mais especial. Que possamos construir um futuro como educadores repleto de brilho e sucesso.

Agradeço aos meus amigos, que sempre me proveram meios de escape, quando necessário, e horas de lazer, que são tão necessárias para que se produza um trabalho bom.

Aos meus colegas de laboratório, pelas conversas jogadas fora e muitos cafés tomados, em especial Jun, Cláudia e Ana, pelo apoio e discussões sobre os assuntos relacionados ao tema da minha dissertação, um agradecimento de coração.

Aos professores Nilson e Key, por fornecerem o laboratório e conselhos sobre o processo de realização do trabalho e de todas as experimentações.

Por último, mas não menos importante, desejo expressar um agradecimento especial ao meu orientador, Key Fonseca de Lima. Suas crenças em meu potencial foram fundamentais, e as inúmeras discussões e risadas compartilhadas, muitas vezes acompanhadas de cafés, tornaram nossa jornada acadêmica ainda mais enriquecedora. Professor, minha sincera gratidão pela orientação essencial em uma das fases mais significativas da minha vida.

"O importante é não parar de questionar."

Albert Einsten

RESUMO

Todos os dias, o impacto do desenvolvimento dos grandes centros urbanos e das tecnologias, com o propósito de facilitar a vida, deixa mais e mais evidente os perigos que sofremos em relação ao som. Conforme o homem vive a sua vida, ele é exposto aos mais diversos tipos de sons, nas mais diversas intensidades, sejam elas de alta intensidade e curta duração ou baixa intensidade, mas de duração contínua. O sistema biológico do indivíduo acaba sofrendo com os problemas que o som pode-lhe causar. Além disso, com o avanço tecnológico, há muitos materiais polímeros que são descartados na natureza e que levam milhares de anos para se decompor. Com o intuito de apresentar novas alternativas à redução do ruído e à sustentabilidade, esta dissertação avalia as propriedades e o coeficiente de absorção sonora para compósitos de fibras de cana-de-açúcar, casca de coco, em conjunto com os polímeros de polisulfona, poliacetal e poliestireno, considerando diferentes espessuras. O coeficiente de absorção sonora é obtido pelo Método da Função de Transferência, com uso dos tubos de impedância de 100mm. A absorção sonora segue as diretrizes da norma ASTM E1050-10 (2012). Os valores obtidos experimentalmente são comparados aos resultados segundo os modelos empíricos de Delany-Bazley (1970) e Allard-Champoux (1992) e, após isso, eram comparadas as suas absorções sonoras com um trabalho da literatura que demonstrou resultados de amostras feitas apenas de fibras naturais. De maneira geral, a utilização da polisulfona não gerou resultados bons, mas os dos outros dois polímeros geraram resultados interessantes. O aumento da espessura das amostras fez aumentar a absorção sonora em frequências mais baixas. Os modelos clássicos confirmaram que o aumento da espessura contribui para melhores absorções em frequência menores. Pode-se afirmar que a melhor proposta depende da faixa de frequência de interesse.

Palavras-chave: Coeficiente de absorção sonora, fibras Naturais, Absorção Sonora, Polímeros

ABSTRACT

Every day the impact of the development of large urban centers and technologies designed to make life easier makes the dangers we suffer in relation to sound more and more evident. As man lives his life, he is exposed to the most diverse types of sounds in the most diverse intensities, whether they are high intensity and short duration or low intensity, but of continuous duration, the individual's biological system ends up suffering from the problems that the sound can cause. Furthermore, with technological advances, there are many polymer materials that are discarded in nature and that take thousands of years to decompose. In order to present new alternatives to noise reduction and sustainability, this dissertation evaluates the properties and sound absorption coefficient for composites of sugar cane fibers, coconut shells together with polysulfone, polyacetal and polystyrene polymers. considering different thicknesses. The sound absorption coefficient is obtained by the Transfer Function Method using tubes with an impedance of 100. Sound absorption follows the guidelines of ASTM E1050-10 (2012) The values obtained experimentally are compared to the results according to empirical models of Delany-Bazley (1970) and Allard-Champoux (1992). And after that, their sound absorptions were compared with a work in the literature that demonstrated results from samples made only from natural fibers. In general, the use of polysulfone did not generate good results, but the other two polymers generated interesting results. Increasing the thickness of the samples increased sound absorption at lower frequencies. Classical models confirmed that increasing thickness contributes to better absorptions at lower frequencies. It can be stated that the best proposal and composites depend on the frequency range of interest.

Keywords: Sound absorption coefficient, natural Fibers, Sound Absorption, Polymers

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1. Deslocamento de um elemento fluido devido à passagem de onda sonora</u>	35
<u>Figura 2. Setup</u>	49
<u>Figura 3. Polisulfona</u>	55
<u>Figura 4. Poliacetal</u>	586
<u>Figura 5. Poliestireno</u>	59
<u>Figura 6. Molde</u>	60
<u>Figura 7. Grampo metálico tipo C para disposição das fibras no molde</u>	58
<u>Figura 8. Amostra de Cana de açúcar com polisulfona</u>	59
<u>Figura 9. Amostra de Cana de açúcar com poliacetal</u>	59
<u>Figura 10. Amostra de Cana de açúcar com poliestireno</u>	64
<u>Figura 11. Amostra de Coco com polisulfona</u>	60
<u>Figura 12. Amostra de Coco com poliacetal</u>	61
<u>Figura 13. Amostra de Coco com poliestireno</u>	64
<u>Figura 14. Tubo de impedância de 100 mm de diâmetro</u>	66
<u>Figura 15. Posicionamento dos microfones para tubo de 100 mm de diâmetro</u>	65
<u>Figura 16. Analisador e gerador de sinais</u>	65
<u>Figura 17. Microfones Brüel & Kjaer Type 4935 de ¼"</u>	66
<u>Figura 18. Coeficientes de Absorção sonora para cana de açúcar de espessura de 20, 30 e 40mm</u>	68
<u>Figura 19. Coeficiente de absorção sonora das amostras de cana-de-açúcar com polisulfona</u>	69
<u>Figura 20. Coeficiente de absorção sonora das amostras de cana-de-açúcar com poliacetal</u>	70
<u>Figura 21. Coeficiente de absorção sonora das amostras de cana-de-açúcar com poliestireno</u>	72

<u>Figura 22. Coeficientes de Absorção sonora para coco de espessura de 20, 30 e 40mm</u>	74
<u>Figura 23. Coeficiente de absorção sonora das amostras de coco com polisulfona</u>	75
<u>Figura 24. Coeficiente de absorção sonora das amostras de coco com poliacetal</u>	77
<u>Figura 25. Coeficiente de absorção sonora das amostras de coco com poliestireno</u>	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de média e desvio padrão para a densidade das amostras.....	62
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

a	aceleração;
c	velocidade do som no meio fluido;
d	vetor velocidade da partícula;
f	frequência
f_c	frequência de corte;
$f_{\text{máx}}$	frequência máxima;
f_{min}	frequência mínima;
i	unidade imaginária;
k_0	número de onda em propagação no ar;
l	espessura do material;
m	massa;
p	pressão sonora;
p_0	pressão sonora no ar;
p_1	pressão medida no microfone 1;
p_2	pressão medida no microfone 2;
p_ω	densidade dinâmica;
r	resistência ao fluxo de ar;
r_0	resistividade ao fluxo de ar;
s	distância entre os microfones 1 e 2;
t	tempo;
u	componente do vetor velocidade da partícula na direção x ;
v	componente do vetor velocidade da partícula na direção y ;
w	componente do vetor velocidade da partícula na direção z ;
x	posição na direção do eixo x ;
C_1	amplitude da onda propagando em direção negativa;
C_2	amplitude da onda propagando em direção positiva;
D	diâmetro interno do tubo;
L_e	comprimento de entrada do tubo;
$R(f)$	coeficiente de reflexão sonoro;
V	volume final do elemento após a passagem da onda sonora;
V_0	volume inicial do elemento;
Z	impedância característica do meio;

Z_c	impedância característica do ar;
Z_s	impedância superficial;
ρ	densidade do meio;
ω	frequência angular;
ξ	componente do deslocamento da partícula instantânea na direção x;
λ	comprimento de onda;
$\mathcal{C}$	condensação.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 CONTEXTO	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA	18
1.4 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. INTRODUÇÃO	20
2.2. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS	21
2.3. FIBRAS NATURAIS.....	25
2.4. COMPÓSITOS, POLÍMEROS E ABSORÇÃO ACÚSTICA	29
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	34
3.1 INTRODUÇÃO	34
3.2 EQUAÇÃO DA ONDA UNIDIMENSIONAL	35
3.3 ONDAS PLANAS MONOCROMÁTICAS (harmônica com frequência $\omega = 2\pi f$)	39
3.4 CAMPO SONORO NO INTERIOR DE TUBO FECHADO	41
3.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ABSORVENTES.....	43
3.5.1 Coeficiente de Absorção Sonoro (α).....	43
3.6 TEORIAS CLÁSSICAS	44
3.6.1 Expressões empíricas de Delany e Bazley	46
3.6.2 Expressões empíricas de Allard e Champoux (1992).....	47
4. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO.....	49
4.1 INTRODUÇÃO	49
4.2 MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	49
5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	54
5.1 INTRODUÇÃO	54
5.2 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	54
5.3 BANCADA EXPERIMENTAL – TUBO DE IMPEDÂNCIA	63
6. ANÁLISE RESULTADOS	69
6.1 INTRODUÇÃO	69

6.2 ANÁLISE 1 – COMPÓSITOS DA CANA DE AÇÚCAR.....	70
6.2.1 Compósito de cana de açúcar e polisulfona	71
6.2.2 Compósito de cana de açúcar e Poliacetal	72
6.2.3 Compósito de cana de açúcar e Poliestireno.....	73
6.2.4 Considerações gerais sobre os compósitos de cana de açúcar.....	74
6.3 ANÁLISE 2 – COMPÓSITOS DO COCO	76
6.2.1 Compósito de coco e polisulfona	77
6.2.2 Compósito de coco e Poliacetal	78
6.2.3 Compósito de coco e Poliestireno	79
6.2.4 Considerações gerais sobre os compósitos de coco.....	81
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
REFERÊNCIAS.....	84

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O desenvolvimento dos grandes centros urbanos e das tecnologias visa facilitar a vida da população. No entanto, muitas vezes passa despercebido um fator extremamente fundamental para a saúde: o que ouvimos. Diariamente, o homem é exposto a sons das mais diversas naturezas, e isso, mesmo que inconscientemente, se reflete em seu comportamento e relação com o mundo. Esse mundo, que está cada vez mais urbanizado e industrializado, a poluição sonora emergiu como um desafio significativo que afeta a saúde e o bem-estar humano. À medida que as sociedades buscam criar ambientes mais sustentáveis e confortáveis, a engenharia acústica ganhou destaque. A absorção acústica, processo pelo qual a energia sonora é convertida em calor dentro de um material, desempenha um papel fundamental na mitigação da poluição sonora e no aprimoramento do conforto acústico.

A exposição contínua ao ruído ao longo do tempo pode causar diversos efeitos negativos para a saúde, tais como aumento da pressão sanguínea, tensões musculares, dores de cabeça e insônia, entre outros (Canlon et al., 2012). Por isso, é essencial priorizar a redução do ruído como um dos principais requisitos para o conforto humano.

Para alcançar esse objetivo, é crucial desenvolver materiais eficientes em termos de absorção acústica e economicamente viáveis, especialmente em setores como automóveis, ambientes industriais e equipamentos domésticos (Ersoy e Kuçuk, 2009). Essa abordagem possibilitará o controle adequado do ruído, contribuindo para um ambiente mais saudável e tranquilo, beneficiando a qualidade de vida das pessoas em geral.

Para apresentar alternativas para reduzir o ruído, o homem tem utilizado materiais acústicos para controle de ruído, como fibras sintéticas. Embora esses materiais tenham grande eficiência na absorção sonora, o grande problema é seu descarte. Esses materiais não podem ser descartados na natureza como estão, pois possuem um tempo longo e

indefinido para sua decomposição. Além disso, não podem ser utilizados como combustível em fornos ou incineradores, pois sua queima libera gases tóxicos para o homem e o meio ambiente.

Esta dissertação explora o domínio da absorção acústica e investiga o potencial da combinação de fibras naturais com polímeros para criar materiais inovadores e sustentáveis de absorção sonora. As fibras naturais têm recebido considerável atenção nos últimos anos devido ao seu baixo impacto ambiental, renovação e propriedades mecânicas excepcionais, como nos estudos de Bittencourt *et. al* (2019) e Berardi *et. al* (2015). Ao mesmo tempo, os polímeros demonstraram notável versatilidade e podem ser adaptados para possuir características acústicas desejadas. Ao sinergizar esses dois materiais, almejamos desbloquear uma abordagem inovadora para a absorção acústica que une sustentabilidade ambiental, desempenho e versatilidade.

A busca pelo aprimoramento da absorção acústica não se limita a aplicações tradicionais, como acústica de edifícios ou isolamento acústico automotivo. Há um interesse crescente em explorar soluções acústicas para desafios contemporâneos, incluindo o tratamento acústico de espaços de escritórios de plano aberto, painéis acústicos para locais públicos e materiais de absorção sonora ecologicamente corretos para produtos de consumo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho acústico em termos do coeficiente de absorção sonora de compósitos de fibras naturais (cana-de-açúcar e coco) e polímeros (polisulfona, poliacetal e poliestireno) em frequência entre 200 até 1600 Hz. Para que o objetivo geral deste trabalho seja atingido, será dividido em 3 objetivos específicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliação experimental do coeficiente de absorção sonora para os compósitos pelo método da função de transferência, de acordo com a norma ASTM E1050-10 (2012);

- b) Comparar os resultados obtidos para cada tipo de compósitos com resultados de testes feitos com apenas fibras naturais;
- c) Analisar os efeitos dos polímeros escolhidos nas fibras naturais e possíveis ganhos ou perdas;

1.3 JUSTIFICATIVA

O uso de fibras naturais no tratamento de superfícies acústicas tem sido objeto de muitas pesquisas ultimamente e tem demonstrado resultados promissores. No entanto, é necessário analisar a possibilidade da adição de polímeros, muitas vezes rejeitos de indústrias, como potencializador em relação à absorção acústica. As fibras são facilmente encontradas como resíduos da agricultura em nosso país, e os polímeros facilmente encontrados como rejeitos das indústrias, tornando-se, assim, uma opção economicamente viável e acessível no controle de ruído.

1.4 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: Será realizada uma abordagem sobre estudos prévios que avaliaram as propriedades acústicas de materiais absorventes. Além disso, serão analisadas a relação entre fibras naturais e polímeros, além da utilização dos polímeros como materiais absorventes, e será explorado o uso de tanto fibras naturais quanto de polímeros de caráter reciclável como alternativa às fibras sintéticas.

Capítulo 3 – Fundamentação teórica: Será apresentado o desenvolvimento da equação da onda unidimensional, bem como a propagação de ondas em dutos circulares. Também serão discutidas as teorias relacionadas às propriedades dos materiais absorventes.

Capítulo 4 – Técnicas de medição: Serão descritos os métodos experimentais utilizados para determinar o coeficiente de absorção sonora dos compósitos.

Capítulo 5 – Procedimentos metodológicos: Detalham-se as etapas para a fabricação das amostras, incluindo informações sobre o material, massa, espessura e densidades utilizadas. Além disso, apresentam-se os equipamentos empregados nos processos de medição para obter o coeficiente de absorção sonora dos materiais.

Capítulo 6 - Análises e resultados: Serão apresentados os resultados do coeficiente de absorção sonora, levando em consideração os diferentes compósitos, as proporções de material (fibra e polímero) e cola, espessuras e comparados com um exemplo da literatura.

Capítulo 7 – Considerações finais: Conclui-se com base nos resultados obtidos e uma breve discussão sobre os mesmos, e por fim, apresenta sugestões para trabalhos futuros a serem realizados nessa área de estudo.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, abordaremos uma revisão bibliográfica que explora os estudos sobre a avaliação das propriedades acústicas de arranjos em multicamadas. Além disso, discutiremos os resultados obtidos por diversos autores no contexto da substituição de materiais sintéticos tradicionalmente empregados no tratamento acústico de superfícies e ambientes, por fibras naturais e compostos de fibras naturais com outros materiais.

Aqui, serão apresentadas pesquisas recentes que se dedicaram a investigar as características acústicas de materiais em multicamadas. Esses estudos visam compreender como a combinação de diferentes camadas de materiais afeta as propriedades de absorção sonora, isolamento acústico e difusão do som.

Ademais, enfatizaremos os trabalhos que exploraram o uso de fibras naturais como substitutos dos materiais sintéticos comumente utilizados no tratamento acústico. Essa abordagem busca identificar alternativas sustentáveis e ecologicamente corretas para melhorar o desempenho acústico de superfícies e ambientes.

Ao longo deste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos por diferentes autores nessas áreas de pesquisa, destacando-se as principais descobertas e contribuições para o conhecimento científico. As informações compiladas fornecerão uma visão abrangente das tendências e avanços recentes na avaliação das propriedades acústicas de arranjos em multicamadas e no estudo do uso de fibras naturais no tratamento acústico.

Dessa forma, espera-se que este capítulo forneça uma base sólida de conhecimento para esse trabalho, com foco na utilização de arranjos em multicamadas e na substituição de materiais sintéticos por fibras naturais.

2.2. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS

Brown e Bolt (1942) apresentam suas descobertas sobre a medição da resistência ao fluxo de materiais acústicos porosos. Eles desenvolveram um método preciso para obter medições de resistência ao fluxo e testaram 24 materiais em uma ampla faixa de velocidades. Seus resultados mostram que há uma variação da resistência ao fluxo com a velocidade para quase todos os materiais. Os autores recomendam o uso de um disco de três polegadas de diâmetro para materiais homogêneos de grão fino, mas esse tamanho é muito pequeno para materiais não homogêneos com superfícies fissuradas. O artigo fornece instruções detalhadas sobre como medir a resistência ao fluxo e inclui um diagrama do aparelho utilizado. Os autores ressaltaram que o aumento da velocidade de escoamento tem uma relação direta com as oscilações de resistividade ao fluxo na medição.

Scott (1946) discute as deficiências das teorias existentes relacionadas à propagação do som ao longo de dutos revestidos com materiais porosos absorvedores de som. Ele apresenta uma nova teoria que investiga a propagação de ondas acústicas no sistema composto de espaço aéreo e revestimento para dois formatos simples de dutos. Os resultados da teoria estão em concordância com os de uma teoria anterior de Morse (1944), desde que a atenuação no duto não seja grande, mas amplas divergências aparecem quando a atenuação no duto se aproxima daquela característica da propagação do som através do material de revestimento em massa. O artigo também inclui um exemplo experimental que mostra que a atenuação encontrada na prática está em acordo com a teoria descrita.

Delany e Bazley (1970) realizaram medições da resistividade de fluxo em amostras de algodão, fibra de mineral e fibra de vidro para obter os valores da impedância característica e número de onda complexo de materiais absorventes. A variação de pressão que atravessa a amostra foi medida em um tubo de impedância utilizando um microfone do tipo sonda. Além disso, o arquivo explica como estimar a resistência ao fluxo de um material com base em sua densidade. A formulação empírica proposta pelos autores apresentou boa concordância com os resultados experimentais. Essas expressões ainda são amplamente utilizadas em estudos sobre o desempenho de materiais absorventes e na avaliação de cavidades acústicas.

Seybert e Soenarko (1981) realizaram uma análise de erros em estimativas espectrais para medir parâmetros acústicos usando campos sonoros aleatórios em dutos.

O artigo discute vários métodos para determinar as propriedades acústicas de materiais e sistemas usando medições de pressão em vários pontos em campos sonoros aleatórios em dutos. Ele também aborda como minimizar erros aleatórios nas estimativas espectrais, incluindo considerações práticas como espaçamento de microfones e coerência entre sinais de microfone. O artigo é bastante técnico e detalhado, mas fornece uma análise abrangente dos métodos e técnicas usados na medição de propriedades acústicas em dutos.

Allard, Champoux e Depollier (1987) apresentam um método para prever as propriedades acústicas de materiais porosos ou fibrosos em incidência normal a partir de medições simples. Matrizes de transferência obtidas a partir da teoria de Biot são usadas para descrever camadas homogêneas e telas que constituem materiais em camadas. A descrição de um material absorvente com o método é fornecida. O artigo também discute a modelagem de materiais absorventes de som em camadas com matrizes de transferência e fornece exemplos de descrição de um absorvente poroso em camadas.

Miki *et al.* (1990) discutem a importância da impedância característica e da constante de propagação na especificação das propriedades acústicas de materiais porosos. O modelo experimental original de Delany e Bazley (1970), mas apresentava limitações quando se tratava de camadas múltiplas. Isso ocorria porque a parte real da impedância da superfície, quando calculada a partir dos modelos de Delany-Bazley, às vezes se tornava negativa em baixas frequências. Para resolver esse problema, foram propostos novos modelos que modificam os modelos originais de Delany-Bazley para garantir a propriedade positiva-real da função de impedância. Esses novos modelos são úteis para prever o comportamento acústico de materiais porosos, mesmo fora do intervalo de frequência de validade dos modelos originais.

Castagnède *et al.*, (2000) discutem, a partir de predições numéricas e testes experimentais pelo Método dos Dois Microfones, os efeitos da compressão em materiais fibrosos na absorção sonora. O arquivo apresenta fórmulas heurísticas simples para prever as mudanças nas propriedades acústicas de materiais porosos durante a compressão. Além disso, o estudo discute como a geometria microscópica dos materiais pode ser modelada para otimizar o design de aplicações específicas.

Komatsu *et al.* (2008) tratam da melhoria dos modelos Delany-Bazley (1970) e Miki (1990) para materiais fibrosos de absorção sonora. Foi construído um novo modelo para prever as propriedades acústicas de materiais fibrosos com base em sua resistividade ao fluxo de ar. Os resultados mostraram que este novo modelo é mais eficaz do que os

métodos convencionais, especialmente para materiais fibrosos de alta densidade e baixa densidade.

Wang *et al.* (2008) exploram os efeitos da compressão em materiais porosos com estrutura elástica na absorção sonora. É utilizado o método da matriz de transferência para analisar as propriedades de absorção de materiais porosos comprimidos e não comprimidos. Eles descobrem que a compressão pode afetar significativamente a absorção sonora, especialmente em altas frequências. A absorção pode diminuir à medida que o material é comprimido, o que pode ter implicações importantes na engenharia de controle de ruído. No entanto, o estudo também mostra que a absorção sonora pode ser restaurada em certa medida quando o material é descomprimido.

Jones e Kessissoglou (2015) propuseram uma simplificação do modelo de Delany e Bazley (1970) para a caracterização acústica de espuma à base de poliuretano, especialmente quando não se dispõe de valores para a resistividade ao fluxo. Para alcançar esse objetivo, foram conduzidas medições experimentais e os resultados referentes à perda de transmissão foram comparados com aqueles obtidos por meio de simulações numéricas e pelo método dos elementos finitos. Os valores obtidos a partir das diferentes abordagens apresentaram uma boa concordância entre si, o que indicou que a simplificação proposta pelos autores é capaz de fornecer resultados precisos para o desempenho acústico desses materiais. Essa simplificação pode ser de grande utilidade em situações em que não se têm informações completas sobre a resistividade ao fluxo da espuma de poliuretano, tornando a caracterização mais acessível e eficiente.

Lima *et al.* (2015), investigaram as propriedades acústicas de amostras de lã de vidro utilizadas em silenciadores dissipativos. Para alcançar esse objetivo, os pesquisadores empregaram uma metodologia que envolveu a avaliação da impedância acústica característica e do número de onda complexo. Esses parâmetros foram ajustados através de otimização e utilizando o método dos elementos finitos. Além disso, uma avaliação experimental foi conduzida por meio de um modelo de câmara dissipativa. Os resultados obtidos através dessa abordagem metodológica foram consistentes e demonstraram eficiência na determinação das propriedades acústicas da lã de vidro.

Terashima (2016), em seu estudo de dissertação de mestrado, avaliou as propriedades acústicas de materiais absorventes acústicos em forma de placas com pequena espessura. As placas analisadas eram feitas de fibra da casca de coco e do forro do teto de um habitáculo veicular. O coeficiente de absorção sonora foi obtido usando o método da função de transferência, enquanto a impedância e o número de onda complexo

foram obtidos pelos métodos das duas cavidades modificados e pelas equações clássicas de Delany e Bazley. Os resultados mostraram que o forro de teto apresentou desempenho superior em comparação com a placa de fibra de coco.

Legat (2017), em seu estudo, utilizou amostras de fibra de coco e espuma de poliuretano foram caracterizadas acusticamente usando o tubo de impedância de 4 microfones. Os mesmos métodos de medição usados por Terashima (2016) foram aplicados, incluindo o Método da Matriz de Transferência. O autor concluiu que, embora os valores obtidos tenham sido coerentes entre os métodos utilizados, eles não foram adequados para caracterizar espessuras finas.

Fesina *et al.* (2017) apresenta um estudo sobre a utilização de técnicas ecologicamente limpas na reciclagem de resíduos de polímeros duros para a produção de materiais eficazes de absorção sonora e construções redutoras de ruído. Foram realizados experimentos para avaliar a eficácia acústica de diferentes tipos de materiais de polímeros porosos e espumados. Os resultados mostraram que esses materiais podem ser eficazes na redução de ruído em uma ampla faixa de frequências, incluindo baixas frequências. Além disso, os autores propõem a utilização de construções de matrizes perfuradas para aplicações em edifícios e outras estruturas.

Botterman *et al.* (2018) discutem sobre a modelagem e otimização da absorção sonora de placas de cimento de lã de madeira. O artigo discute diferentes modelos de impedância usados para prever a impedância acústica desse material e como otimizar sua absorção sonora. Ele também explora como a largura, densidade, espessura e espessura da cavidade de ar das placas afetam sua absorção sonora e se a variação de densidade pode melhorar a absorção sonora das placas.

Cao *et al.* (2018) revisam, em seu artigo, os materiais porosos para absorção sonora. É apresentado um resumo do progresso recente no design e fabricação de materiais porosos de absorção sonora. Nela abrange a introdução do mecanismo de absorção sonora e a evolução dos modelos de previsão para materiais porosos de absorção sonora, bem como a pesquisa e desenvolvimento de conceitos de design e fabricação de espumas de absorção sonora e materiais fibrosos de absorção sonora. A revisão conclui com algumas perspectivas e visões para os materiais porosos de absorção sonora.

Duponi *et al.* (2018) apresentam um novo design de material microestruturado para absorção de som em baixas frequências. O material é composto por uma matriz perfurada com uma série de ressonadores periódicos, chamados de "materiais multi-panqueca". O estudo mostra que esses materiais têm uma eficiência significativamente

maior na absorção de som em baixas frequências do que os materiais acústicos convencionais. O artigo discute a teoria por trás do design do material e apresenta resultados experimentais que comprovam sua eficácia. O estudo sugere que esse novo design de material pode ter aplicações em uma variedade de estruturas, incluindo edifícios e veículos.

Oancea *et al.* (2018) discutem sobre o coeficiente de absorção sonora do concreto sustentável com diferentes materiais de resíduos. Ele discute como a substituição de materiais tradicionais por resíduos pode afetar as propriedades acústicas do concreto. O estudo apresenta resultados de testes realizados em diferentes misturas de concreto com materiais como serragem, casca de arroz e cinzas volantes. Os resultados mostram que a substituição de materiais pode melhorar a absorção sonora do concreto, tornando-o uma opção mais sustentável para barreiras acústicas e outras aplicações. Foram adotadas duas espessuras diferentes, de 40 mm e 80 mm, e o coeficiente de absorção sonora foi determinado usando o procedimento modificado de Feng da norma ISO 10534:1998. Os resultados mostraram que cada tipo de concreto sustentável apresentou coeficientes de absorção sonora mais altos do que o concreto convencional. O estudo destaca que a utilização de materiais de resíduos em outros materiais pode representar uma solução sustentável para os problemas de resíduos e ruídos.

2.3. FIBRAS NATURAIS

Nor, Jamaludin e Tamiri (2004) realizaram um estudo preliminar sobre a absorção sonora usando fibras de coco em camadas múltiplas. O objetivo é explorar o potencial de fibras naturais como materiais acústicos e investigar o efeito de camadas de placas microperfuradas e espaços de ar na absorção sonora. O programa WinFLAG foi utilizado para simulação computacional dos coeficientes de absorção acústica. O artigo sugere que as fibras de coco têm potencial como material acústico e que a adição de camadas de placas microperfuradas e espaços de ar pode melhorar a absorção sonora.

O artigo de Fouladi, Ayudi e Nor (2011) aborda as características acústicas da fibra de coco como material poroso. Foram utilizados dois modelos analíticos para analisar sua absorção acústica: o modelo de Allard, baseado na transmissão de ondas, e a técnica de Delany-Bazley, derivada de equações empíricas. Experimentos em um tubo de impedância foram realizados para apoiar as análises. O modelo de Allard mostrou padrões gerais e previu ressonâncias com precisão, mas sua formulação era complicada e exigiria

ajustes para aplicação em fibras industriais. Por outro lado, o método de Delany-Bazley foi uma boa aproximação para o comportamento acústico geral, sendo fácil de usar sem a necessidade de modificar fórmulas para fibras industriais mais rígidas, que geralmente apresentavam picos mais baixos. A fibra de coco natural apresentou um coeficiente médio de absorção de 0,8 para frequências acima de 1360 Hz, 940 Hz e 578 Hz, em espessuras de 20 mm, 30 mm e 45 mm, respectivamente. O estudo ressalta a importância de modelar a fibra industrial para uso comercial, incluindo características como rigidez, retardante de fogo, antifúngico e inflamabilidade. O aglutinante foi o único aditivo utilizado pelo fabricante para unir as fibras e adicionar rigidez. Portanto, a modelagem analítica é uma ferramenta útil para estudar as características acústicas da fibra de coco, e a fibra industrial precisa ser adequadamente modelada para seu uso comercial.

Asdrubali et al. (2012) fez uma revisão abrangente com foco em materiais sustentáveis usados em pesquisas acústicas. O estudo explora vários materiais, incluindo fibras naturais, materiais reciclados e materiais de base biológica, e discute sua eficácia na absorção de som e controle de ruído. O artigo enfatiza a importância da sustentabilidade na pesquisa acústica e fornece insights e orientações valiosas para os pesquisadores.

AL Rahman et al. (2013) examinaram o impacto do tamanho da fibra e da densidade aparente em amostras microporosas de folha de palmeira e fibra de casca de coco. Os autores se concentraram em avaliar as propriedades de absorção acústica desses materiais. Os resultados demonstraram que a absorção acústica das fibras de folha de palmeira e casca de coco é aumentada quando fibras menores são utilizadas, aumentando a densidade aparente. Além disso, isso indica que o uso de fibras mais finas e a obtenção de maior densidade aparente melhoram as capacidades de absorção acústica desses materiais.

Berardi e Iannace (2015) revisam a literatura sobre experiências acústicas de materiais naturais e destacam a importância de avaliar o impacto ambiental de materiais de construção em todo o ciclo de vida do material. Ainda relatam a caracterização acústica de várias fibras naturais, incluindo madeira, cânhamo, coco, cortiça, cana, papelão e lã de ovelha. O coeficiente de absorção e a resistência ao fluxo para amostras de diferentes espessuras foram medidos utilizando o tubo de impedância. Este estudo mostra as limitações dos modelos teóricos originalmente definidos para materiais porosos com fibras homogêneas quando aplicados a materiais naturais. Finalmente, o texto fornece

algumas sugestões para o uso dessas fibras naturais para aplicações de absorção sonora em edifícios.

Othmani *et. al* (2016) apresentam um estudo sobre o desempenho acústico de um material à base de resíduos de cana-de-açúcar. O objetivo é explorar o potencial de utilizar resíduos agrícolas como materiais acústicos. Foram medidos a resistividade ao fluxo e o coeficiente de absorção acústica de várias amostras com diferentes propriedades físicas, e avaliado o efeito de cada propriedade no desempenho acústico. O estudo inclui uma comparação entre resultados experimentais e teóricos, e discute abordagens de modelagem e caracterização do material.

Samsudin *et. al* (2016) em sua revisão destacam que o uso de fibras naturais, como palha de arroz, coco, folha de chá, cânhamo, bambu, algodão, partículas de madeira, lã e argila, é uma alternativa mais ecológica e sustentável aos materiais sintéticos no âmbito da absorção acústica. As fibras naturais são biodegradáveis, renováveis e têm menos risco potencial para a saúde humana. O artigo também destaca que as propriedades físicas, como a espessura, densidade e porosidade das fibras, são os principais fatores que contribuem para o desempenho de absorção sonora das fibras naturais.

Or, Putra e Selamat (2017) exploram o potencial das fibras de resíduos de frutos de palma de óleo como um material acústico sustentável. Foram realizados experimentos para medir o coeficiente de absorção sonora de amostras das fibras com diferentes densidades e espessuras. Os resultados mostraram que as fibras têm um bom desempenho de absorção sonora em uma ampla faixa de frequências, e que a introdução de um espaço de ar pode melhorar ainda mais o desempenho de absorção em frequências mais baixas. Este estudo sugere que as fibras podem ser uma alternativa natural e sustentável aos materiais acústicos tradicionais.

Bittencourt (2018), em sua dissertação de mestrado, avaliou o comportamento acústico de fibras naturais de coco, sisal e cana-de-açúcar. Para realizar essa avaliação, a autora empregou o método da função de transferência em tubo de impedância, bem como testes empíricos para determinar os valores do coeficiente de absorção sonora, número de onda complexo e impedância característica das fibras estudadas. Entre os materiais analisados, a cana-de-açúcar com espessura de 30 mm apresentou os resultados mais favoráveis em termos de absorção sonora. Posteriormente, no ano de 2019, a autora demonstrou que os valores do coeficiente de absorção sonora podem variar de acordo com o modelo empírico adotado. O modelo de Delany e Bazley tende a fornecer valores acima da média em comparação com os valores obtidos experimentalmente em baixas

frequências. Por outro lado, o modelo de Champoux e Allard se mostra mais conservador, apresentando resultados inferiores aos valores experimentais em baixas e médias frequências. Bittencourt ressalta que tais diferenças são mais significativas quando se analisam amostras com espessuras menores.

Lim *et. al* (2018) apresentam um estudo sobre o desempenho da absorção sonora de fibras naturais de cânhamo. Os autores investigaram os efeitos da espessura e densidade de massa nas propriedades de absorção sonora dos espécimes de fibras de cânhamo. Os resultados mostraram que a espessura e a densidade de massa têm um impacto significativo no coeficiente de absorção sonora. Além disso, os autores realizaram testes de coeficiente de absorção sonora de incidência normal e aleatória em uma câmara de reverberação. Os resultados indicaram que as fibras de cânhamo têm um potencial promissor como absorvedores acústicos sustentáveis.

Golkulkumar (2019) conduz uma revisão abrangente, fornecendo uma análise detalhada dos métodos de medição das propriedades acústicas das fibras naturais, incluindo a impedância acústica, a absorção sonora e a transmissão sonora. Discute-se os principais parâmetros físicos que afetam a absorção sonora das fibras naturais, como a densidade, a porosidade, a espessura e a rigidez. O artigo compara o desempenho acústico das fibras naturais com o de materiais sintéticos, como a lã de vidro e a espuma de poliuretano. Uma das principais contribuições do artigo é a apresentação de uma nova tabela que expressa mais informações sobre a eficiência das fibras naturais no desempenho acústico. Essa tabela inclui informações sobre a densidade, a porosidade, a espessura e a rigidez de diferentes tipos de fibras naturais, bem como sua eficiência na absorção sonora em diferentes frequências.

Mansur (2021), em sua dissertação de mestrado, fez a análise do comportamento acústico das fibras naturais de coco, cana-de-açúcar, sisal e feno, além da adição de uma lacuna de ar entre a terminação rígida do tubo de impedância e as amostras, a fim de analisar seus desempenhos acústicos. Para realizar a avaliação foi utilizado o método da função de transferência em tubo de impedância, assim como os testes empíricos. Os resultados mostraram que o aumento da espessura contribui para melhores absorções em frequências menores para todos os materiais. No entanto, ao analisar densidades menores, observou-se que a absorção sonora varia e oscila em faixas de frequência maiores, o que indica que a melhor proposta e material dependem da frequência de interesse. Quando foi inserida uma lacuna de ar entre as amostras e a terminação rígida do tubo de impedância, verificou-se que, para as maiores densidades, a variação do pico e do coeficiente de

absorção sonora no domínio da frequência foi pouco influenciada. Por outro lado, para amostras com menores densidades, a inclusão da lacuna de ar fez com que o pico se deslocasse para baixas frequências. Por fim, os melhores resultados em termos de absorção sonora para frequências mais baixas foram obtidos quando maiores espessuras foram utilizadas. No entanto, para as maiores densidades das fibras de cana e feno, os resultados não foram confiáveis, indicando que a alta resistividade ao fluxo possivelmente resulta em menor porosidade do material. Portanto, os modelos clássicos para alta porosidade não se aplicam nessas situações particulares.

2.4. COMPÓSITOS, POLÍMEROS E ABSORÇÃO ACÚSTICA

Gle et al. (2011) conduziram uma pesquisa sobre um composto de concreto de cânhamo, um material de construção sustentável que combina partículas de cânhamo, aglutinante e água. Os pesquisadores examinaram vários tipos de aglutinantes e diferentes tamanhos de partícula. Os resultados experimentais demonstraram que os concretos de cânhamo feitos com aglutinantes de cal e partículas menores exibiram excelentes propriedades de absorção acústica, alcançando um coeficiente de absorção de aproximadamente 0,45 em baixas frequências.

Jayamani e Hamdam (2013) discutem sobre o estudo dos coeficientes de absorção sonora de compósitos reforçados com fibras naturais. Eles investigaram a influência de diferentes polímeros misturados com fibras naturais de cânhamo para seus coeficientes de absorção sonora. Os polímeros foram termoplásticos (polipropileno) e termofixos (ureia-formaldeído). Os resultados indicaram que os compósitos feitos com termoplásticos apresentaram coeficientes de absorção sonora mais altos em comparação com os compósitos feitos com termofixos. Eles descobriram que o tipo de polímero utilizado afetou significativamente as propriedades de absorção sonora dos compósitos.

Huang *et. al* (2013) conduziram um estudo sobre o uso de fibras de coco em placas compostas para absorção sonora. Os resultados revelaram que a adição de fibras de coco melhorou significativamente o desempenho acústico das placas, aumentando a absorção sonora em uma ampla faixa de frequências. Além disso, o estudo também avaliou outras propriedades físicas das placas, como resistência à tração e permeabilidade ao ar. Os pesquisadores concluíram que as fibras de coco podem ser uma alternativa promissora e

econômica para melhorar a eficácia de materiais de absorção sonora em aplicações de construção residencial.

Peng *et. al* (2014) apresentaram um estudo sobre as propriedades mecânicas e acústicas de um material absorvedor de som feito de fibra natural e poliéster. Os testes realizados avaliaram diversas condições de produção, como densidade, resistência à tração, absorção sonora e outras propriedades do material composto em diferentes condições de produção. Os resultados mostraram que a temperatura de prensagem a quente, o tempo de compósito, a proporção de fibra de madeira para poliéster, o teor de resina e o teor de agente espumante afetam significativamente as propriedades físicas e mecânicas do material. Além disso, a profundidade das cavidades atrás do material composto também influencia sua capacidade de absorção sonora. Os autores concluem que o material composto pode ser uma opção promissora para aplicações em que a absorção sonora é importante, porém os métodos para a construção das amostras podem modificar muito as capacidades mecânicas.

Jayamani *et. al* (2015) discutem sobre o desenvolvimento de materiais absorvedores de som baseados em compósitos de polímero de fibra natural. O estudo se concentra nos efeitos do tratamento alcalino nas propriedades acústicas dos compósitos que se baseia na lavagem e enxágue das fibras com água destilada para remover poeira e impurezas, seguido pela imersão das fibras em uma solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) a 5% em água destilada. Os resultados mostram que o tratamento alcalino das fibras leva a uma melhor adesão entre a fibra e o polímero, resultando em um aumento dos coeficientes de absorção sonora dos compósitos.

Rey *et. al* (2015) investigaram as propriedades acústicas de materiais têxteis reciclados, utilizados como elementos centrais em barreiras acústicas, como poliéster puro (PES) ou fibra PET. O estudo avaliou as capacidades de absorção sonora desses materiais e o desempenho acústico geral. Os autores concluíram que esses compósitos podem contribuir para a engenharia de controle de ruído, apresentando uma solução sustentável e eficaz para mitigar a poluição sonora.

Mamtaz *et. al* (2016) abordam o desenvolvimento de materiais compostos de fibras naturais para absorção acústica. Embora as fibras naturais sejam menos prejudiciais ao meio ambiente e mais disponíveis do que as fibras sintéticas, elas ainda apresentam algumas limitações, como a presença de umidade, diâmetro mais espesso e menor qualidade antifúngica. Para superar essas limitações, é necessário o pré-tratamento das fibras naturais, que pode reduzir o diâmetro da fibra e melhorar a adesão da fibra à matriz

do composto. No entanto, o pré-tratamento também pode reduzir o desempenho de absorção acústica das fibras naturais. A incorporação de materiais granulares no composto de fibra tratada é uma solução potencial para substituir a umidade perdida durante o pré-tratamento e melhorar a absorção acústica em baixas frequências. Os resultados desta revisão indicam que vários fatores podem influenciar a absorção acústica em baixas frequências de materiais compostos de fibras naturais e granulares. Esses fatores incluem o tamanho da fibra, o tamanho do grão, a densidade do composto, a espessura da camada de amostra, entre outros. A diminuição do diâmetro da fibra pode aumentar o conteúdo de fibra no composto e melhorar a absorção por meio de uma fricção mais viscosa das moléculas de ar com uma área de superfície maior. Além disso, a densidade do composto tem uma grande influência na porosidade e resistividade do fluxo do composto, o que pode afetar a absorção acústica. A revisão também discute diferentes modelos analíticos que podem ser usados para estimar a absorção acústica de materiais compostos de fibras naturais e granulares.

Marques *et. al* (2018) abordam o uso de resíduos de polietileno tereftalato (PET) na produção de placas de isolamento termoacústico, visando avaliar as propriedades térmicas e mecânicas dessas placas, em comparação com as de outros materiais de isolamento. Os resultados mostram que as placas de PET reciclado apresentam desempenho semelhante ou superior em relação a outros materiais de isolamento, como lã de vidro, lã de rocha e espuma de poliuretano, além de serem mais resistentes ao fogo. O artigo também discute a importância da reciclagem de PET e seu potencial para reduzir o impacto ambiental da indústria de construção.

Setyowati *et. al* (2018) discutem a possibilidade de melhorar a absorção sonora por meio de painéis de polímero reforçado com fibras de água-hortelã e casca de coco. Os autores detalham o processo de criação dos painéis, que envolve a mistura de fibras secas com poliéster e peróxido de metil etil cetona como catalisador. Eles também discutem três abordagens diferentes para melhorar o desempenho de absorção sonora dos painéis, incluindo a adição de uma cavidade, a criação de uma estrutura acoplada e a adição de um material poroso. Em síntese, os autores concluem que os painéis de polímero reforçado com fibras de água-hortelã e casca de coco apresentam potencial para substituir os painéis sintéticos em aplicações de controle de ruído de construção.

Echeverria *et. al* (2019) apresentam uma pesquisa sobre o uso de materiais compósitos híbridos reforçados com fibras para absorção sonora em aplicações de construção. Eles exploram a combinação de materiais poliméricos fibrosos naturais e

sintéticos para criar protótipos isotrópicos de HFRC (Compósitos Reforçados com Fibra Híbrida) que absorvem efetivamente o som. O artigo aborda a caracterização dos materiais, o processo de fabricação dos protótipos, os testes de desempenho acústico e a comparação com materiais tradicionais de absorção sonora. Os resultados indicam que os HFRCs têm um desempenho acústico superior em relação aos materiais convencionais, além de serem mais sustentáveis e econômicos.

Cheewawuttipong e Memon (2021) investigam a produção de um compósito polimérico reforçado com fibras de coco. O compósito é produzido através da infiltração de polímeros líquidos em fibras de coco sob vácuo. O estudo discute as propriedades mecânicas, térmicas e acústicas do compósito, bem como seu potencial aplicação em diversas indústrias. Em relação à acústica, os testes revelam que a adição de polímeros líquidos às fibras de coco aumenta a capacidade de absorção sonora do compósito em frequências superiores a 2000 Hz. Em suma, o estudo demonstra que o compósito produzido a partir de fibras de coco apresenta boas propriedades de absorção sonora e pode ser utilizado em aplicações como painéis acústicos e revestimentos de paredes.

Bhuvaneswari *et. al* (2022) fornecem uma revisão abrangente sobre o comportamento de absorção de som e higrotérmico de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais. Os autores realizaram uma análise detalhada da literatura existente sobre o assunto, abordando tópicos como as propriedades dos materiais, os métodos de fabricação, as técnicas de caracterização e as aplicações potenciais. Concluem que os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais possuem grande potencial em diversas áreas, incluindo a construção civil, a indústria automotiva e a fabricação de móveis, devido às suas propriedades mecânicas, térmicas e acústicas favoráveis. No entanto, ressaltam a necessidade de mais pesquisas para aprimorar a durabilidade e a resistência à umidade desses materiais.

Chanlert *et. al* (2022) investigaram o impacto de diferentes adesivos, uréia-formaldeído e acetato de polivinila, nas propriedades acústicas de compósitos de fibra de palmeira palmyra. Os autores avaliaram o coeficiente de absorção sonora das amostras e a perda de transmissão sonora usando proporções variadas de adesivos. Testes experimentais foram conduzidos para medir as propriedades acústicas dos compósitos em diferentes frequências. O estudo destacou o papel crucial da escolha do adesivo nas propriedades acústicas dos compósitos. Os resultados sugerem que o adesivo de uréia-formaldeído pode ser mais adequado para aplicações que requerem melhor absorção sonora e perda de transmissão do que o adesivo de acetato de polivinila.

Naik *et. al* (2022) discutem o uso de materiais compósitos de fibras naturais em aplicações automotivas, com foco especial na acústica. Os autores destacam que a mistura de fibras tem um efeito significativo na absorção sonora e na permeabilidade do ar, e que as fibras naturais podem ser usadas para produzir tecidos de isolamento acústico mais acessíveis e duráveis para automóveis, eletrodomésticos e aplicações arquitetônicas. Além disso, mencionam que as fibras naturais, como o cânhamo, o sisal e o juta, são recursos renováveis que podem ser colhidos várias vezes por ano, tornando-as uma opção mais sustentável do que os materiais sintéticos.

CAPÍTULO 3

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INTRODUÇÃO

O som é uma forma de energia que pode ser definida como uma manifestação de movimento ondulatório que se propaga em um meio elástico a partir de uma fonte sonora. Essa propagação ocorre através de oscilações de partículas no meio, resultando em variações de pressão e compressão.

É importante ressaltar que, durante a propagação do som, não ocorre transferência de matéria, apenas de energia (Gerges, 2000, Möser, 2009). Essa energia é transmitida através de ondas sonoras, que se movem em diferentes frequências e amplitudes.

No contexto deste capítulo, serão apresentadas as deduções da equação da onda unidimensional, que descreve matematicamente o comportamento das ondas sonoras. Além disso, serão abordados os princípios da propagação da onda sonora em dutos circulares, explorando suas características e fenômenos associados.

Outro aspecto relevante a ser discutido são as propriedades dos materiais absorventes utilizados neste estudo. Esses materiais desempenham um papel importante na absorção do som, reduzindo a intensidade das ondas sonoras e minimizando reflexões indesejadas.

Em suma, este capítulo fornecerá um embasamento teórico sólido sobre a natureza do som, a propagação das ondas sonoras em dutos circulares e a importância dos materiais absorventes. Essas informações são essenciais para compreender os fundamentos acústicos abordados neste estudo.

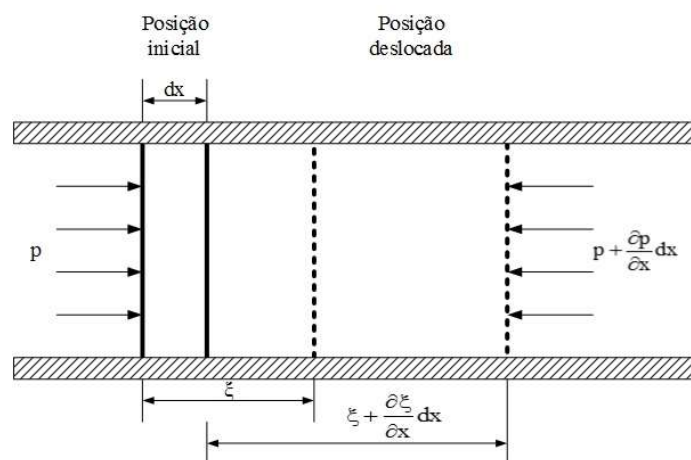
3.2 EQUAÇÃO DA ONDA UNIDIMENSIONAL

As ondas planas representam um tipo simples de ondas acústicas que se propagam em meios fluidos, caracterizadas por frentes de onda planas e propagação unidimensional. Ao considerar um tubo reto de seção transversal circular, as ondas acústicas planas compartilham semelhanças com as ondas longitudinais. No desenvolvimento da equação da onda, é crucial considerar que as forças de atrito devido à viscosidade do meio e os efeitos das forças gravitacionais são desprezíveis. Além disso, presume-se que não há dissipação de energia durante o escoamento, o meio é considerado incompressível e a variação da pressão sonora é muito pequena em comparação com a pressão estática do meio (Munjál, 1987).

Quando uma onda plana se move, os planos adjacentes experimentam deslocamentos em relação ao equilíbrio. Esses deslocamentos podem ser descritos como funções da posição e do tempo. A equação relacionada a esses deslocamentos pode ser obtida a partir do princípio de conservação da massa e das equações que descrevem as propriedades termodinâmicas do fluido.

Assim, ao considerar as características das ondas acústicas planas em meios fluidos, as propriedades do tubo de seção circular e as condições ideais de escoamento, podemos estabelecer uma base teórica sólida para o estudo do comportamento das ondas sonoras e suas equações correspondentes. Esses fundamentos são essenciais para a compreensão aprofundada da acústica e suas aplicações práticas.

Figura 1. Deslocamento de um elemento fluido devido à passagem de onda sonora



Fonte: Terashima, 2016.

Na Figura 1, é ilustrada a pressão sonora (p) em um elemento fluido inicialmente em repouso. Com a perturbação ocorrida em um pequeno intervalo de tempo (dt), é possível representar a nova posição de uma das faces, de x para $x + \xi$, onde ξ representa o deslocamento instantâneo da partícula. A segunda face, inicialmente na posição $x + \partial x$, se move para $x + dx + \xi + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx$ sob ação da pressão $p + \frac{\partial p}{\partial x} dx$.

Considerando que a força atuante está relacionada apenas à propagação da onda sonora e tomando S como a área da seção transversal do duto, podemos estabelecer a seguinte relação:

$$F_{liq} = pS - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) S. \quad (3.1)$$

$$F_{liq} = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} dx \right) S. \quad (3.2)$$

O deslocamento por unidade de tempo na direção x é definido como a velocidade da partícula, representado por:

$$u_x = \frac{\partial \xi}{\partial t}. \quad (3.3)$$

A aceleração da partícula é a taxa de variação da velocidade em relação ao tempo e pode ser expressa como:

$$a = \frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (3.4)$$

A Segunda Lei de Newton estabelece que a força aplicada é igual ao produto da massa pela aceleração:

$$\Sigma F = m.a = \frac{d(mv)}{dt} \quad (3.5)$$

No contexto do meio de propagação da onda sonora, podemos obter o diferencial de massa multiplicando a massa específica (ρ) pelo volume do meio:

$$dm = \rho dv. \quad (3.6)$$

Sendo o volume obtido a partir da área da seção transversal pela posição inicial da partícula, obtém-se a identidade:

$$dm = \rho S dx . \quad (3.7)$$

Substituindo-se as equações 3.2, 3.4 e 3.7 na equação 3.5, resulta-se em:

$$- \left(\frac{\partial p}{\partial x} dx \right) S = \rho S dx \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} . \quad (3.8)$$

e, simplificando:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} . \quad (3.9)$$

Considerando que o processo de propagação de ondas é isentrópico, sem alteração de entropia, a velocidade do som c no meio fluido por ser determinada a partir da seguinte derivada:

$$c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} . \quad (3.10)$$

Derivando-se a Eq. 3.10 em relação ao tempo, tem-se:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} . \quad (3.11)$$

Na área da acústica, a condensação ($\mathcal{C}$) refere-se a um fenômeno que ocorre durante a propagação de ondas sonoras em um meio. A condensação acústica é uma região onde as partículas do meio vibram e se aproximam umas das outras, resultando em uma região de alta pressão. É importante destacar que essa condensação não está relacionada à condensação física de gases em líquidos, mas sim a uma região de alta pressão em uma onda sonora.

Durante a propagação de uma onda sonora, as partículas do meio oscilam em torno de suas posições de equilíbrio, movendo-se para frente e para trás. Quando a onda sonora se aproxima, a região de condensação é formada, onde as partículas se movem em direção umas às outras, comprimindo o meio e aumentando a pressão local. (PIERCE, 1991).

Sendo ρ_0 a densidade do fluido não perturbado e ρ a densidade do fluido perturbado, tem-se a definição de condensação como:

$$\mathcal{C} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 . \quad (3.12)$$

Sabendo-se que a densidade é dada pelo quociente da massa pelo volume, é possível verificar a seguinte identidade:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (3.13)$$

Substituindo a equação 3.13 na equação 3.12 e manipulando os termos, obtemos:

$$\mathcal{C} = \frac{V_0 - V}{V}. \quad (3.14)$$

Sabendo-se que V_0 é o volume inicial e V o volume final do elemento após passagem da onda sonora, a condensação pode ser expressa em função da variação de volume, ou seja, em termos do deslocamento da partícula de acordo com a Figura 1, tem-se:

$$\mathcal{C} = \frac{V_0 - V}{V} = \frac{S \partial x - S \left(x + \partial x + \xi + \frac{\partial \xi}{\partial x} \partial x \right)}{S \left(x + \partial x + \xi + \frac{\partial \xi}{\partial x} \partial x \right)}. \quad (3.15)$$

ou ainda:

$$\mathcal{C} = \frac{-\frac{\partial \xi}{\partial x}}{1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}}. \quad (3.16)$$

Aplica-se a hipótese de que o deslocamento da partícula atravessado pela onda sonora é muito pequeno, mesmo para a propagação de ondas sonoras de grande intensidade. Nestas condições, pode-se dizer que estes deslocamentos são de ordem 10^{-4} m. Portanto,

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} \ll 1. \quad (3.17)$$

Em consequência da simplificação fornecida pela Eq. 3.17, pode-se reescrever a condensação como sendo:

$$\mathcal{C} = -\frac{\partial \xi}{\partial x}. \quad (3.18)$$

Além disso, a densidade do fluido pode ser escrita em termos da condensação. Desta forma, a Eq. 3.12 pode ser reescrita como:

$$\rho = \rho_0(1 + \mathcal{C}). \quad (3.19)$$

Derivando a Eq. 3.19 em relação ao tempo e substituindo na Eq. 3.11, obtém-se

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial t}. \quad (3.20)$$

Derivando a Eq. 3.20 novamente em relação ao tempo, conduz a

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (3.21)$$

A densidade ρ permanece praticamente constante quando o diferencial de fluido é atravessado por uma onda sonora (meio incompressível), portanto

$$\rho_0 = \rho. \quad (3.22)$$

Com posse da Eq. 3.22, pode-se reescrever a Eq. 3.9 como sendo

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (3.23)$$

A Equação 3.23 é conhecida como a equação da conservação da quantidade de movimento. Agora, substituindo a Eq. 3.18 na derivada da Eq. 3.9 em relação ao espaço, tem-se

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -\rho_0 \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right). \quad (3.24)$$

Finalmente, a equação diferencial linear unidimensional homogênea com coeficiente constante para um meio estacionário e incompressível é obtida pela substituição da Eq. 3.21 na Eq. 3.24, ou seja:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (3.25)$$

3.3 ONDAS PLANAS MONOCROMÁTICAS (harmônica com frequência $\omega = 2\pi f$)

Considerando uma onda unidirecional harmônica se propagando na direção x , tem-se:

$$p(x, t) = \tilde{P}(x) e^{j\omega t} \quad (3.26)$$

$$p(x, t) = P(x)[\cos \omega t - j \sin \omega t] \quad (3.27)$$

Sendo $\tilde{P}(x)$ a amplitude complexa da onda. Dada a equação da onda unidimensional, a solução harmônica pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.28)$$

substituindo 3.26 em 3.28:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (\tilde{P}(x) e^{j\omega t}) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\tilde{P}(x) e^{j\omega t}) = 0 \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{P}(x)}{\partial x^2} e^{j\omega t} - \frac{1}{c_0^2} \tilde{P}(x) (j\omega)^2 e^{j\omega t} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{P}(x)}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{c_0^2} \tilde{P}(x) = 0$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{P}(x)}{\partial x^2} + k^2 \tilde{P}(x) = 0 \quad (3.30)$$

onde $k = \frac{\omega}{c}$ e 3.30 a equação da onda no domínio da frequência.

Propondo uma solução para a equação linear homogênea de segunda ordem do tipo (Kreyszig, 1999):

$$\tilde{P}(x) = e^{sx} \quad (3.31)$$

derivando,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{P}(x)}{\partial x} &= s e^{sx} \\ \frac{\partial^2 \tilde{P}(x)}{\partial x^2} &= s^2 e^{sx} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Substituindo 3.31 e 3.32 em 3.30:

$$s^2 e^{sx} + k^2 e^{sx} = 0$$

$$s^2 = -k^2$$

$$s = \sqrt{-k^2} = \sqrt{-1} \sqrt{k^2}$$

$$s = \pm jk \quad (3.33)$$

Portanto a solução para 3.31, torna-se:

$$\tilde{P}(x) = \tilde{A}e^{-jkx} + \tilde{B}e^{jkx} \quad (3.34)$$

sendo $\tilde{A}$ e $\tilde{B}$ as amplitudes complexas da pressão sonora. Para determiná-las, propõem-se as condições de contorno para a equação diferencial. A Eq. 3.26 tornar-se:

$$p(x, t) = [\tilde{A}e^{-jkx} + \tilde{B}e^{jkx}]e^{j\omega t}$$

ou

$$p(x, t) = \tilde{A}e^{-j(kx - \omega t)} + \tilde{B}e^{j(kx + \omega t)} \quad (3.35)$$

$$p(x, t) = \tilde{A}e^{j(\omega t - kx)} + \tilde{B}e^{j(\omega t + kx)} \quad (3.36)$$

3.4 CAMPO SONORO NO INTERIOR DE TUBO FECHADO

Considere um tubo de seção constante fechado, onde o campo sonoro é excitado por um pistão em uma das extremidades, movendo-se com velocidade $u(t)$ em $x = 0$. A velocidade do pistão é dada por:

$$u(t) = u_0 e^{i\omega t} \quad (3.37)$$

Para a equação da onda unidimensional a solução é dada pela equação 3.36. Substituindo a equação 3.36 na equação da conservação da quantidade de movimento (Equação 3.23), tem-se:

$$p_0 \frac{\partial u}{\partial t} = -Ak_0 i e^{i(\omega t - k_0 x)} + Bk_0 i e^{i(\omega t + k_0 x)} \quad (3.38)$$

Resolvendo a Eq. 3.38 em relação ao tempo, obtém-se a equação da velocidade da partícula u no interior do tubo fechado, ou seja:

$$u(x, t) = \frac{1}{p_0 c_0} [Ae^{i(\omega t - k_0 x)} - Be^{i(\omega t + k_0 x)}] \quad (3.39)$$

Na terminação rígida, quando $x = L$, a velocidade da partícula u é nula. Portanto, substituindo esta condição na Equação 3.39, obtém-se:

$$u(L, t) = \frac{1}{p_0 c_0} [A e^{i(\omega t - k_0 L)} - B e^{i(\omega t + k_0 L)}] = 0 \quad (3.40)$$

ou

$$A e^{-ik_0 L} - B e^{ik_0 L} = 0 \quad (3.41)$$

No pistão, em $x = 0$, a velocidade da partícula é igual a $u_0 e^{i\omega t}$. Portanto, a equação 3.39, torna-se:

$$u(0, t) = \frac{1}{p_0 c_0} [A e^{i\omega t} - B e^{i\omega t}] = u_0 e^{i\omega t} \quad (3.42)$$

ou

$$A - B = u_0 p_0 c_0 \quad (3.43)$$

Resolvendo-se o sistema de equações fornecidos pelas Equações 3.41 e 3.43, obtém-se:

$$A = \frac{-p_0 c_0 u_0 e^{-ik_0 L}}{2i \operatorname{sen}(k_0 L)} \quad (3.44)$$

e

$$B = \frac{-p_0 c_0 u_0 e^{ik_0 L}}{2i \operatorname{sen}(k_0 L)} \quad (3.45)$$

Substituindo 3.44 e 3.45 nas Equações 3.37 e 3.39, tem-se:

$$p(x, t) = \frac{-p_0 c_0 u_0}{2i \operatorname{sen}(k_0 L)} [e^{ik_0(L-x)} + e^{-ji(L-x)}] e^{i\omega t} \quad (3.46)$$

e

$$u(x, t) = \frac{-u_0}{2i \operatorname{sen}(k_0 L)} [e^{ik_0(L-x)} - e^{-ik_0(L-x)}] e^{i\omega t} \quad (3.47)$$

onde

$$e^{ik_0(L-x)} = \cos(k_0(L-x)) + i \operatorname{sen}(k_0(L-x)) \quad (3.48)$$

e

$$e^{-ik_0(L-x)} = \cos(k_0(L-x)) - i \operatorname{sen}(k_0(L-x)) \quad (3.49)$$

Aplicando as identidades trigonométricas fornecidas pelas Equações 3.48 e 3.49, pode-se reescrever 3.46 e 3.47 como sendo:

$$p(x, t) = ip_0 c_0 u_0 \frac{\cos [k_0(L-x)]}{\text{sen}(kL)} e^{i\omega t} . \quad (3.50)$$

$$u(x, t) = u_0 \frac{\text{sen} [k_0(L-x)]}{\text{sen}(kL)} e^{i\omega t} . \quad (3.51)$$

Observando as equações 3.50 e 3.51, conclui-se que $p(x,t)$ e $u(x,t)$ estão defasados de 90° .

3.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ABSORVENTES

3.5.1 Coeficiente de Absorção Sonora (α)

Segundo Beranek (2012), o coeficiente de absorção sonora é uma medida da capacidade de um material ou superfície de absorver energia sonora incidente. É representado pela letra α e varia de 0 a 1, sendo 0 quando o material reflete totalmente o som incidente e 1 quando o material absorve totalmente o som incidente. O coeficiente de absorção sonora depende da frequência do som incidente, sendo comumente medido em diferentes bandas de frequência. É representado graficamente por curvas de absorção sonora, conhecidas como curvas de resposta de absorção sonora, que mostram a variação do coeficiente de absorção em função da frequência

Cox (2016) dita que o coeficiente de absorção sonora está relacionado à capacidade de um material converter a energia sonora em outras formas de energia, como energia térmica, devido a processos de dissipação. Materiais porosos, como espumas acústicas, têm coeficientes de absorção sonora elevados devido à capacidade de dissipar a energia sonora através de múltiplas reflexões e fricção nos poros.

A absorção sonora é importante em ambientes onde se deseja controlar o ruído, como salas de concerto, estúdios de gravação, salas de aula, escritórios e ambientes industriais. Materiais com coeficientes de absorção sonora altos são utilizados para reduzir a reverberação, melhorar a inteligibilidade do som e criar um ambiente acusticamente confortável.

A utilização de materiais fibrosos ou porosos nos filtros acústicos automotivos, nas cavidades acústicas, em recintos onde convivem pessoas, na indústria em geral são utilizados para melhorar o conforto acústico ou fazer parte de um isolamento ou ainda, reduzir o nível de ruído reverberado. Para distinguir um material de outro no que se refere

ao isolamento sonoro, por exemplo, são realizados ensaios em laboratório para determinação do coeficiente de absorção.

Neste trabalho, foi considerada apenas a incidência normal da onda, uma vez que apenas a técnica do tubo de impedância foi adotada.

Materiais fibrosos e porosos são conhecidos por apresentarem boa capacidade de absorção sonora em médias e altas frequências. Além disso, verifica-se que ao aumentar a espessura do material, é possível obter uma absorção significativa mesmo em baixas frequências (Berardi e Iannace, 2015). Uma estratégia adicional para melhorar a absorção sonora, é afastar o material absorvente da superfície a ser tratada acusticamente. Quando a amostra é posicionada a uma distância de um quarto de comprimento de onda da parede rígida, é garantido que a velocidade da partícula sonora será maior, pois ocorrerá uma dissipação máxima (Oldfield, 2006). Essas considerações são importantes no design e na seleção de materiais para aplicações de controle de ruído, permitindo a otimização da absorção sonora em diferentes faixas de frequência e melhorando a eficiência do tratamento acústico

3.6 TEORIAS CLÁSSICAS

Antes de obter os coeficientes de absorção sonora dos materiais, é possível determinar outras propriedades acústicas por meio de métodos experimentais ou equações empíricas. Essas propriedades incluem a impedância característica e o número de onda complexo, que desempenham um papel crucial na descrição do comportamento das ondas sonoras nos materiais.

De acordo com Kuttruff (2016), a impedância característica é uma medida da resistência oferecida pelo material à passagem da onda sonora. Ela está relacionada à densidade e à velocidade do som no material, e sua magnitude e fase podem ser determinadas experimentalmente. A impedância característica descreve a relação entre a pressão sonora e a velocidade de partícula no material. O número de onda complexo, por sua vez, também conhecido como número de onda complexo de propagação, é uma medida da atenuação da onda sonora à medida que se propaga no material. Leva em consideração a frequência, a velocidade do som e os efeitos de perda de energia no material. O número de onda complexo é uma quantidade complexa, composta por uma

parte real e uma parte imaginária, que descrevem a atenuação espacial e temporal da onda sonora.

Essas propriedades acústicas são importantes para entender a interação entre as ondas sonoras e os materiais e para determinar os coeficientes de absorção sonora e sendo descritas como:

$$z = R - iX \quad (3.54)$$

$$k = \alpha - i\beta \quad (3.55)$$

onde,

z é a impedância complexa característica do material absorvente;

k é o número de onda complexo do material absorvente;

R é a resistência característica do material absorvente;

X é a reatância característica do material absorvente;

α é a constante de propagação do material absorvente;

β é a constante de atenuação do material absorvente

A parte real da impedância acústica, denotada por z , representa a resistência acústica do material, enquanto a parte imaginária é chamada de reatância acústica. A parte imaginária do número de onda complexo, representada por k , é conhecida como constante de atenuação e é responsável pelo decaimento da amplitude das ondas sonoras, ou seja, pela dissipação do som.

De acordo com Doutres et al. (2015), a parte real da impedância acústica indica que a velocidade de propagação do som através do material absorvente é sempre menor do que a velocidade do som no ar. Essa diferença é atribuída às características do material, como a sua porosidade e resistividade. Em materiais com baixa resistividade do fluxo de ar, os valores de Z e k se aproximam dos valores no ar.

No entanto, nas frequências de 200 a 1600 Hz, muitos materiais absorventes não são eficientes na absorção sonora, e a parte real da impedância acústica tende a ser muito pequena em comparação com a parte imaginária, como mencionado por Savioja et al. (2015). Isso ocorre porque a dissipação do som é mais pronunciada nessas frequências, resultando em uma maior predominância da reatância acústica.

3.6.1 Expressões empíricas de Delany e Bazley

Em 1970, Delany e Bazley propuseram expressões para impedância acústica e número de onda complexo a partir de resultados experimentais de resistividade ao fluxo (r_0). Segundo os autores, z e k poderiam ser obtidos por:

$$z = \rho_0 c_0 \left[1 + 0,0571 \left(\frac{\rho_0 f}{r_0} \right)^{-0,754} - i 0,087 \left(\frac{\rho_0 f}{r_0} \right)^{-0,732} \right] \quad (3.56)$$

e

$$k = i\omega/c_0 \left[1 + 0,0978 \left(\frac{\rho_0 f}{r_0} \right)^{-0,700} - i 0,189 \left(\frac{\rho_0 f}{r_0} \right)^{-0,595} \right] \quad (3.57)$$

sendo ρ_0 a densidade do ar, c_0 a velocidade do som no ar e ω a frequência angular de excitação.

De acordo com Liu e Chen (2014), a eficiência de absorção sonora de um material está diretamente relacionada à sua resistividade ao fluxo. Quanto maior a resistividade ao fluxo, menor será a capacidade do material de absorver o som. No entanto, é importante destacar que, em situações em que a resistividade ao fluxo é muito baixa, a eficiência na conversão de energia sonora em energia térmica também será reduzida. Isso indica que há um equilíbrio a ser considerado na escolha dos materiais absorventes, levando em conta a resistividade adequada para obter um desempenho acústico eficiente sem comprometer a dissipação de energia.

A Equação 3.58 apresenta outra expressão proposta por Ver e Beranek (2005) para o cálculo da impedância superficial z_s partir dos números obtidos para z e k e espessura (t) da amostra avaliada.

$$z_s = z \coth(kt) \quad (3.58)$$

Com o valor de z_s é possível chegar ao valor do coeficiente de absorção sonora para incidência normal, apresentado pela Equação 3.59.

$$\alpha = 1 - \left| \frac{z_s - \rho_0 c_0}{z_s + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (3.59)$$

Uma das limitações do modelo diz respeito às inconsistências físicas, que podem surgir no cálculo da impedância superficial, principalmente a baixas frequências.

3.6.2 Expressões empíricas de Allard e Champoux (1992)

Em busca de previsões mais precisas do coeficiente de absorção sonora em diferentes faixas de frequência, Allard e Champoux (1992) propuseram uma formulação que leva em consideração as forças inerciais e viscosas presentes no material absorvente quando é atravessado por uma onda sonora. Essa abordagem visa corrigir as inconsistências físicas encontradas nas equações empíricas anteriores, especialmente em baixas frequências, e relaciona a densidade dinâmica do material $\rho(\omega)$ com essas forças. Essa formulação busca fornecer estimativas mais realistas do comportamento acústico do material absorvente.

A densidade dinâmica é definida pela Equação 3.60:

$$\rho(\omega) = \rho_0 = \left[1 + \frac{1}{i2\pi} \left(\frac{r_0}{\rho_0 f} \right) G_1 \left(\frac{\rho_0 f}{r_0} \right) \right] \quad (3.60)$$

$$G_1(\rho_0 f / r_0) = [1 + i\pi (\rho_0 f / r_0)]^{\frac{1}{2}} \quad (3.61)$$

Sendo o Módulo de Bulk a relação média entre o deslocamento molecular entre os poros, obtém-se as Equações 3.62 e 3.63:

$$k(\omega) = \gamma \rho_0 \left[\gamma - \frac{\gamma - 1}{\left[1 + \left(\frac{1}{i8\pi P_r} \right) \left(\frac{\rho_0 f}{r_0} \right) \right]^{-1} G_2(\rho_0 f / r_0)} \right]^{-1} \quad (3.62)$$

$$G_2(\rho_0 f / r_0) = G_1(\rho_0 f / r_0) 4P_r \quad (3.63)$$

onde,

γ razão de calores específicos;

ρ_0 a pressão estática do meio;

Pr o número de Prandt.

CAPÍTULO 4

4. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, vamos explorar os métodos experimentais empregados para determinar o coeficiente de absorção sonora dos compostos estudados. Apresenta-se o Método da Função de Transferência, proposto por Chung e Blaser (1980), utilizando tubos de impedância de 100 mm. Além disso, discute-se a aplicação da norma ASTM E1050-10 (2012). Essas técnicas serão detalhadas nesta seção, fornecendo informações sobre sua utilização e contribuindo para a obtenção de dados precisos sobre o comportamento acústico dos materiais analisados.

4.2 MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

O método da função de transferência é amplamente utilizado na área da acústica para caracterizar a capacidade de absorção sonora de diferentes materiais. Ele permite a obtenção de informações precisas sobre como um material reage à incidência de ondas sonoras em termos de absorção, reflexão e transmissão.

A medição da função de transferência envolve a análise da relação entre a pressão sonora incidente e a pressão sonora transmitida ou refletida pela superfície do material. Essa relação é obtida ao posicionar dois microfones em locais estratégicos ao longo do tubo de impedância, onde são realizadas as medições das pressões sonoras. Com base nessas medições, é possível determinar o espectro cruzado e o espectro de potência, que fornecem informações sobre a eficiência de absorção acústica do material em diferentes frequências.

O tubo de impedância utilizado no método possui uma seção circular constante, o que permite a análise de ondas planas no interior do tubo. Uma extremidade do tubo é conectada a um alto-falante, que emite sinais aleatórios de ondas estacionárias, e a outra extremidade é onde a amostra do material é posicionada, de forma tangente à terminação rígida. Essa configuração garante que a incidência das ondas sonoras seja normal à superfície da amostra, simplificando a análise.

As técnicas de medição foram inicialmente apresentadas por Seyber e Ross (1977) e posteriormente aprimoradas e aplicadas ao tubo de impedância por Chung e Blaser (1980). A função de transferência nesse método pode ser interpretada como a colocação de dois microfones em distâncias conhecidas ao longo do tubo, com o objetivo de determinar o espectro cruzado e o espectro de potência.

A padronização desse método pela norma ASTM E1050-10 (2012) proporciona uma abordagem consistente e uniforme na realização das medições, garantindo resultados comparáveis entre diferentes estudos e laboratórios. Isso é fundamental para o avanço do conhecimento na área e para o desenvolvimento de materiais com melhor desempenho acústico em diversas aplicações, como isolamento sonoro em construções, absorção em salas de música, controle de ruído em veículos, entre outros.

O tubo de impedância utilizado possui seção circular constante e uma de suas extremidades é conectada a um alto-falante, que emite sinais aleatórios de ondas estacionárias. A outra extremidade do tubo é onde a amostra é posicionada, tangente à terminação rígida, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Setup



Fonte: O autor, 2023

O campo de pressão sonora no interior do tubo pode ser descrito como:

$$p(x, t) = C_1 e^{i(\omega t - k_0 x)} + C_2 e^{i(\omega t + k_0 x)} \quad (4.1)$$

onde,

C_1 e C_2 são amplitudes sonoras das ondas incidente e refletiva, respectivamente em [Pa];

ω é a frequência angular em [rad/s];

k_0 é o número de onda em [m^{-1}];

t é o tempo em [s];

x é a coordenada longitudinal;

i é a unidade imaginária e tem valor igual a $\sqrt{-1}$.

As pressões sonoras nos microfones 1 e 2 no domínio do tempo, podem ser definidas por:

$$p_1(t) = C_1 e^{i(\omega t + k_0 x)} + C_2 e^{i(\omega t - k_0 x)} \quad (4.2)$$

$$p_2(t) = C_1 e^{i(\omega t + k_0 x)} + C_2 e^{i(\omega t - k_0 x)} \quad (4.3)$$

Os primeiros termos nas duas equações correspondem à onda incidente, ou seja, à direção negativa em relação ao eixo x. Por outro lado, os segundos termos representam a onda refletida, que está associada à direção positiva.

A função de transferência (equação 4.4) é definida como a razão entre a pressão medida no microfone 2 e a pressão medida no microfone 1. Essa função de transferência fornece informações sobre a relação entre as pressões sonoras nos dois pontos de medição e é uma medida importante para avaliar a interação entre a onda incidente e a onda refletida.

$$H_{12}(f) = \frac{p_2(t)}{p_1(t)} = \frac{C_1 e^{i(\omega t + k_0 x_2)} + C_2 e^{i(\omega t - k_0 x_2)}}{C_1 e^{i(\omega t + k_0 x_1)} + C_2 e^{i(\omega t - k_0 x_1)}} \quad (4.4)$$

sendo,

p_1 a pressão medida no microfone 1;

p_2 a pressão medida no microfone 2;

H_{12} a função de transferência.

A Equação 4.4 pode ser simplificada, obtendo-se:

$$H_{12}(f) = \frac{p_2(t)}{p_1(t)} = \frac{C_1 e^{ik_0 x_2} + C_2 e^{-ik_0 x_2}}{C_1 e^{ik_0 x_1} + C_2 e^{-ik_0 x_1}} \quad (4.5)$$

Ao dividir o numerador e denominador da Equação 4.5 pela amplitude da onda incidente C_1 , obtém-se:

$$H_{12}(f) = \frac{(e^{ik_0 x_2} + C_2)/(C_1 e^{-ik_0 x_2})}{(e^{ik_0 x_1} + C_2)/(C_1 e^{-ik_0 x_1})} \quad (4.6)$$

$$H_{12}(f) = \left(\frac{e^{ik_0 x_2} + C_2}{C_1 e^{-ik_0 x_2}} \right) \left(\frac{C_1 e^{-ik_0 x_1}}{e^{ik_0 x_1} + C_2} \right) \quad (4.7)$$

O coeficiente de reflexão na acústica é uma medida que descreve a quantidade de energia sonora refletida por uma superfície em relação à energia sonora incidente. Ele é utilizado para quantificar a capacidade de uma superfície em refletir ondas sonoras.

Quando uma onda sonora encontra uma superfície, parte da energia sonora é refletida de volta ao ambiente, enquanto parte é absorvida ou transmitida. O coeficiente de reflexão é calculado como a razão entre a energia sonora refletida e a energia sonora incidente. É geralmente expresso como um valor entre 0 e 1, ou como uma porcentagem entre 0% e 100%.

A partir da razão referente aos valores de amplitude das ondas refletida e incidente, é possível obter o coeficiente de reflexão $R(f)$ (Munjial, 1987; Allard e Atalla, 2009).

$$R(f) = \left| \frac{c_2}{c_1} \right| \quad (4.8)$$

onde,

$R(f)$ é o coeficiente de reflexão

Ao substituir a Equação 4.8 em 4.7, obtém-se uma nova equação de $R(f)$ em relação à função de transferência:

$$R(f) = \frac{H_{12}e^{ik_0x_1} - e^{ik_0x_2}}{e^{-ik_0x_2} - H_{12}e^{-ik_0x_1}} \quad (4.9)$$

Sabendo-se que s é a distância entre os microfones e x_1 e x_2 as coordenadas longitudinais, torna-se verdadeira a relação $x_2 = x_1 - s$:

$$R(f) = \frac{H_{12} - e^{-ik_0s}}{e^{ik_0s} - H_{12}} e^{2ik_0x_1} \quad (4.10)$$

Segundo Chung e Blaser (1980), o coeficiente de absorção sonora (α) em função da frequência pode ser obtido por:

$$\alpha(f) = 1 - |R(f)|^2 \quad (4.11)$$

Que é equação principal utilizada nesse trabalho.

CAPÍTULO 5

5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os seis tipos de compostos de fibras naturais e polímeros utilizados na fabricação das amostras. Esses materiais foram selecionados devido às suas propriedades acústicas já demonstradas em estudo anteriores e potencialidades de absorção sonora, além da disponibilidade dos materiais em um âmbito sustentável.

A Seção 5.2 detalha as composições específicas de fibras e polímeros, bem como as proporções de cola utilizadas na confecção das amostras. Além disso, são fornecidas informações sobre as densidades, dimensões e especificações das fibras, que desempenham um papel crucial na análise experimental posterior.

Na Seção 5.3, é apresentada a bancada experimental utilizada para a obtenção do coeficiente de absorção sonora. Essa bancada é composta por um conjunto de tubos de impedância com um diâmetro de 100 mm, que foram selecionados de acordo com as necessidades do estudo. Os tubos de impedância são essenciais para realizar medições precisas e padronizadas do coeficiente de absorção sonora dos materiais.

Além disso, são apresentados os cálculos necessários para determinar a faixa de frequência mínima e máxima a ser utilizada durante os experimentos. Esses cálculos são importantes para garantir que apenas ondas planas se propaguem no duto circular, assegurando a validade dos resultados obtidos. A escolha adequada da faixa de frequência é crucial para uma análise acústica precisa e confiável dos materiais.

Ao fornecer essas informações detalhadas sobre os materiais utilizados e a metodologia experimental, este capítulo contribui para a compreensão aprofundada do comportamento acústico dos compostos de fibras naturais e polímeros investigados, permitindo a obtenção de dados relevantes e confiáveis sobre seu coeficiente de absorção sonora.

5.2 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

O processo de fabricação das amostras dos compósitos de fibras naturais e polímeros seguiu uma metodologia cuidadosa para garantir a consistência e a qualidade dos resultados. Além da seleção criteriosa dos materiais e da proporção estabelecida entre eles, foram adotadas outras medidas importantes.

Para as fibras de cana-de-açúcar e de coco, buscou-se obter uma homogeneidade do conjunto, o que facilitou o manuseio e a disposição das fibras no molde. Essa homogeneidade contribuiu para a uniformidade das amostras e para a confiabilidade dos resultados obtidos nas medições.

O trabalho teve início com a escolha de dois tipos de fibras naturais e três tipos de polímeros. Os materiais para fabricação manual das amostras são as seguintes: fibras de cana-de-açúcar, fibras de coco, Poliacetal, Poliestireno (Isopor) e Polisulfona. Para preparação das amostras, cada tipo de material foi separado obedecendo às mesmas relações de fibra, polímero e cola entre as amostras, independentemente do tipo de material, e então foram colocados em moldes metálicos para secagem em estufa.

A relação entre os materiais foi escolhida de forma a manter a densidade entre as amostras: 8 g de fibra, 8 g do polímero escolhido e 4 g de cola.

Em relação a manufatura dos compósitos, foi utilizada uma técnica estritamente manual, onde os materiais eram pesados e misturados à mão. Houve uma grande dificuldade em deixar as amostras o mais homogêneas possíveis, pois muitas vezes era difícil misturar os materiais de uma forma aceitável. Devido à granularidade dos polímeros e das fibras naturais, muitas vezes era difícil a mistura dos dois com a cola para que se obtivesse uma amostra aceitável.

Portanto, para a construção das amostras de fibras e polisulfona (Ver imagem 3) foram adicionados primeiro a fibra natural escolhida e a cola, misturadas e só após isso foi adicionada a polisulfona para que ele se prendesse mais facilmente à mistura, pois devido à granulometria do polisulfona sem o aglutinante, ele acabava por ficar no fundo do recipiente de mistura, o que dificultava a homogeneidade.

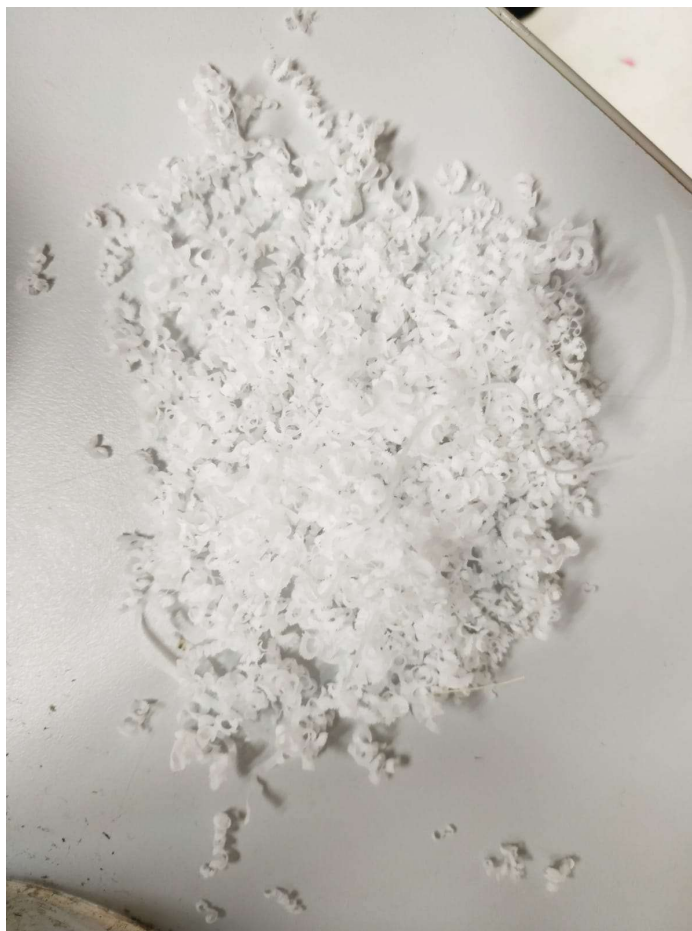
Figura 3. Polisulfona



Fonte: O autor, 2023

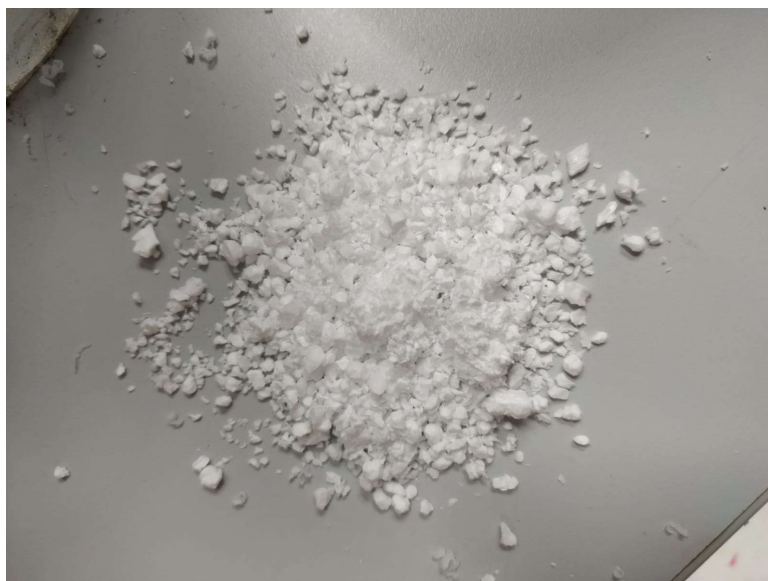
Em relação aos outros dois polímeros (Poliacetal e Poliestireno), primeiro foram misturados a fibra natural e o polímero escolhido até obter uma massa visualmente homogênea e somente após isso eram adicionados a cola. Devido à granulometria dos dois polímeros (Ver imagem 4 e 5), se a cola fosse colocada antes da mistura do polímero com a fibra, o polímero escolhido tem uma tendência a se aglutinar, prejudicando a homogeneidade da peça e aumentando as diferenças entre as amostras. Por isso, foram tomadas as devidas precauções para minimizar o desvio-padrão entre as amostras apresentadas.

Figura 4. Poliacetal



Fonte: O autor, 2023

Figura 5. Poliestireno



Fonte: O autor, 2023

A escolha do molde com diâmetro interno de 100 mm foi determinante para a realização das medições do coeficiente de absorção sonora, pois esse tamanho de tubo de impedância é amplamente aceito e proporciona condições ideais para análises acústicas precisas. A utilização de grampos nas regiões centrais do molde garantiu o fechamento adequado e a manutenção da espessura desejada de 10 mm das amostras. Além disso, os pequenos furos presentes na tampa do molde desempenharam um papel importante em relação ao acúmulo de umidade, possibilitando a secagem mais ágil da amostra.

O objetivo desta etapa foi a fabricação de 10 amostras de cada compósito para cada relação, as quais foram utilizadas para medir o coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância de 100 mm de diâmetro interno. As fibras foram escolhidas de forma a garantir uma homogeneidade no conjunto, facilitando a disposição no molde. A Figura 6 apresenta um exemplo do molde utilizado para o diâmetro de 100 mm. Os pequenos furos na tampa do molde visam garantir uma cura mais rápida do compósito formado pela fibra, polímero e cola (adesivo PVA – Acetato de Polivinila disperso em H₂O – Fabricante Cascola).

Figura 6. Molde



Fonte: O autor, 2023

Para garantir a espessura desejada de 10 mm e o fechamento do molde, foram utilizados dois grampos nas regiões centrais da peça, conforme mostrado na Figura 7. Esse procedimento foi utilizado na fabricação de todas as amostras dos seis diferentes tipos de compósitos.

Figura 7. Grampo metálico tipo C para disposição das fibras no molde



Fonte: O autor, 2023

Para os testes das amostras de 20mm e 30mm de espessura, cada amostra foram de 10mm de espessura foi combinada com outra amostra no tubo de impedância, simulando assim uma amostra de espessura maior.

As figuras de 8 a 13 apresentam as amostras dos seis compostos de materiais mencionados para o diâmetro de 100 mm. É importante destacar que foram produzidas 10 amostras de cada compósitos de fibras, polímeros e cola, totalizando 60 amostras que foram medidas e analisadas.

Figura 8. Amostra de Cana de açúcar com polisulfona



Fonte: O autor, 2023

Figura 9. Amostra de Cana de açúcar com poliacetal



Fonte: O autor, 2023

Figura 10. Amostra de Cana de açúcar com poliestireno



Fonte: O autor, 2023

Figura 11. Amostra de coco com polisulfona



Fonte: O autor, 2023

Figura 12. Amostra de coco com poliacetal



Fonte: O autor, 2023

Figura 13. Amostra de coco com poliestireno



Fonte: O autor, 2023

As densidades (após a cura das amostras) e o desvio padrão em função de cada tipo de material, são apresentadas na Tabela 1. No Apêndice A podem ser vistos os resultados para todas as amostras.

Tabela 1 – Resultados de média e desvio padrão para a densidade das amostras

Tipo do Compósito	Densidade Média (kg/m ³)	Desvio-padrão (kg/m ³)	Coeficiente de Variância
Cana e Polisulfona	212,38	17,78	8%
Cana e Poliacetal	197,76	15,31	8%
Cana e Poliestireno	198,52	13,10	7%
Coco e Polisulfona	211,34	10,55	5%
Coco e Poliacetal	205,33	10,16	5%
Coco e Poliestireno	185,09	16,11	9%

Fonte: O autor, 2023

5.3 BANCADA EXPERIMENTAL – TUBO DE IMPEDÂNCIA

O coeficiente de absorção sonora é determinado utilizando o tubo de impedância, especificamente o tubo de baixa frequência, com amostras de 100 mm de diâmetro. A técnica dos dois microfones é empregada, seguindo o Método da Função de Transferência desenvolvido por Chung e Blaser (1980). Na Figura 14, são apresentados os dois tubos de impedância utilizados, fabricados pela Euro Acoustic, com a marca SCS 9020B/K.

O coeficiente de absorção sonora é uma medida que quantifica a capacidade de um material em absorver a energia sonora incidente. Para determinar esse coeficiente, o tubo de impedância é uma ferramenta fundamental na acústica experimental.

A escolha do tubo de baixa frequência se deve às características das amostras e aos objetivos do experimento. Esse tipo de tubo possibilita uma análise detalhada das propriedades acústicas dos materiais, especialmente em frequências mais baixas, que são de interesse particular para muitas aplicações práticas.

A técnica dos dois microfones, baseada no Método da Função de Transferência proposto por Chung e Blaser (1980), foi adotada para realizar as medições. Essa técnica envolve a colocação de dois microfones em posições específicas dentro do tubo de impedância, permitindo a determinação do espectro de pressão sonora e o cálculo do coeficiente de absorção.

Os tubos de impedância da Euro Acoustic, modelo SCS 9020B/K (Figura 14), reforçam a busca por equipamentos confiáveis e precisos para a realização das medições. Esses tubos foram selecionados devido à sua reputação no campo da acústica experimental e sua adequação para as exigências do estudo em questão.

Portanto, o uso do tubo de impedância de baixa frequência, a técnica dos dois microfones e a seleção dos tubos da Euro Acoustic são elementos essenciais para garantir a qualidade e a validade das medições do coeficiente de absorção sonora, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do comportamento acústico dos materiais analisados.

Figura 14. Tubo de impedância de 100 mm de diâmetro



Fonte: O autor, 2023

A frequência de corte de onda plana, representada por f_c , corresponde à frequência máxima na qual ocorre a propagação exclusiva de ondas de frente plana no interior do tubo de impedância. Essa frequência é determinada pela equação 5.1, que leva em consideração a velocidade do som (c) na propagação e o diâmetro interno (D) do tubo.

A equação 5.1 é fundamental para estabelecer a faixa de frequência em que o tubo de impedância permite a propagação eficiente de ondas planas. Ela indica que a frequência de corte é inversamente proporcional ao diâmetro interno do tubo. Quanto maior o diâmetro, menor a frequência de corte, e vice-versa. Além disso, a equação considera a velocidade do som como um fator determinante para a propagação das ondas.

Ao calcular a frequência de corte de onda plana, é possível determinar a faixa de frequência adequada para realizar as medições no tubo de impedância. Essa faixa é essencial para obter resultados precisos e confiáveis do coeficiente de absorção sonora das amostras, garantindo que apenas ondas de frente plana se propaguem no interior do tubo, conforme necessário para a técnica de medição adotada.

$$f_c < \frac{1,84 \, c}{\pi D} \quad (5.1)$$

A Equação 5.1 leva em consideração somente o diâmetro do tubo e a velocidade do som em seu interior. Uma outra análise é a faixa de frequência válida para as medições em função do espaçamento entre microfones utilizado (Abom e Boden, 1988).

O intervalo de confiança é dado por:

$$\frac{0,1 \, c}{2s} < f < \frac{0,8 \, c}{2s} \quad (5.2)$$

Onde:

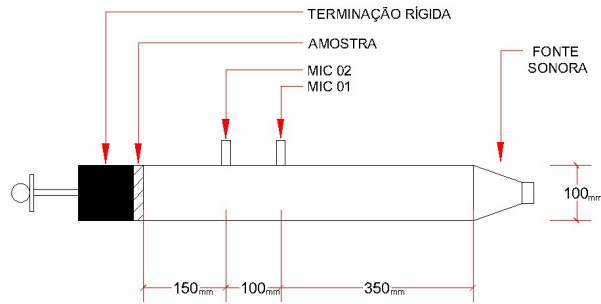
c : Velocidade do som (m/s)

s : Espaço entre os microfones (m)

Ao considerar as frequências de corte, frequências máximas e mínimas para o tubo, foram escolhidos os intervalos de 200 a 1.600 Hz para o aparato de 100 mm.

A Figura 15 apresenta as distâncias entre os microfones. Por recomendação da norma ASTM E 1050-10 (2012), utilizou-se como sinal o ruído aleatório com tempo de medição de 20 segundos para cada configuração de amostras analisada.

Figura 15. Posicionamento dos microfones para tubo de 100 mm de diâmetro



Fonte: Mansur, 2021

Para que a aquisição e processamento do sinal, foram necessários os seguintes equipamentos:

- 1) O analisador e gerador de sinais da marca Brüel & Kjaer Type 3160-A-042 com quatro canais de entrada e dois de saída, Figura 16;

Figura 16. Analisador e gerador de sinais



Fonte: O Autor, 2023

- 2) Dois microfones pré-polarizados de campo livre da marca Brüel & Kjaer Type 4935 de $\frac{1}{4}$ " com sensibilidade 5,6 mV/Pa , Figura 17.

Figura 17. Microfones Brüel & Kjaer Type 4935 de ¼"



Fonte: O Autor, 2023

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes ao coeficiente de absorção sonora para os seis tipos de compósitos analisados. Os materiais utilizados foram as fibras naturais de cana de açúcar e coco, e os materiais poliméricos utilizados foram o poliestireno, polisulfona e o poliacetal. Cada fibra natural foi misturada com todos os polímeros totalizando 6 compósitos para as análises.

Para realizar a análise dos resultados, é necessário um ponto de partida para obter uma comparação. Portanto, buscou-se um artigo que faça o estudo apenas das fibras naturais e que utilizasse o mesmo método metodológico para que se minimizasse o erro que possíveis diferenças na metodologia pudessem causar a absorção sonora. Portanto o artigo escrito por Bittencourt et. al (2019) foi o escolhido para que pudesse ser feita a comparação dos resultados colhidos pelos autores de amostras feitas das mesmas fibras naturais escolhidas nessa dissertação, com os resultados encontrados nesse estudo.

Esse estudo foi escolhido como base por comparação pois a autora se encontrava no mesmo laboratório do autor dessa dissertação o que facilitava qualquer resolução de problemas que pudessem aparecer.

Esse capítulo será dividido em

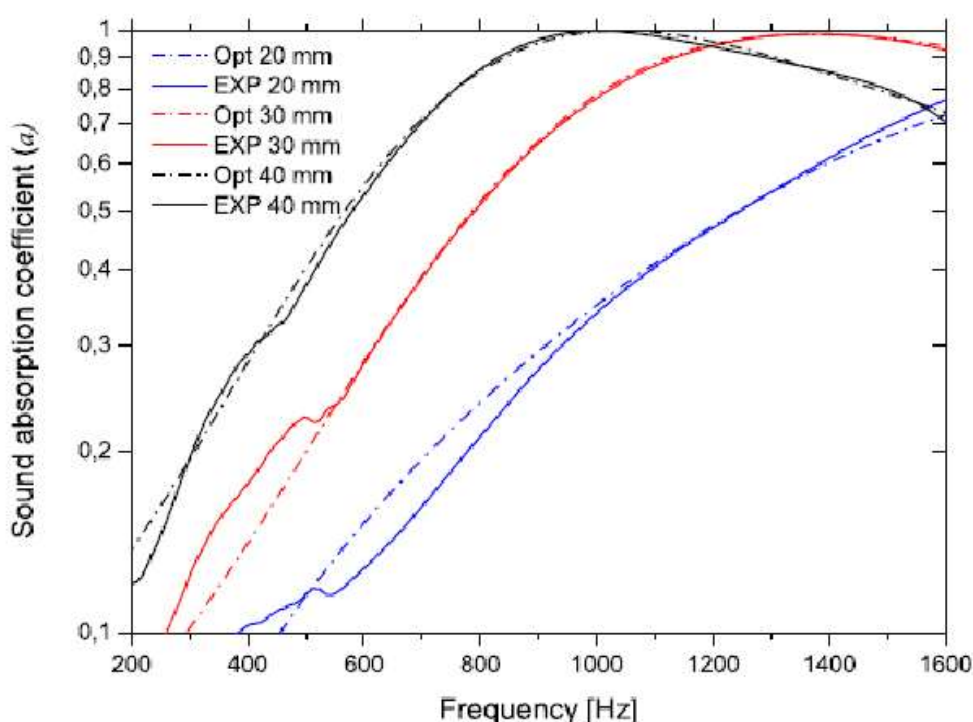
Análise 1 – Os resultados tratam das medições nos tubos de impedância com diâmetro de 100 mm dos compósitos de cana de açúcar e dos diversos polímeros, comparando os resultados obtidos nesse estudo com os resultados de Bittencourt *et.al* (2019). As amostras analisadas possuem as espessuras de 10, 20 e 30 mm;

Análise 2 – Esta seção segue os mesmos processos da análise 1, porém com os compósitos feitos com fibra natural de coco e diversos polímeros.

6.2 ANÁLISE 1 – COMPÓSITOS DA CANA DE AÇUCAR

Esse conjunto de resultados analisados apresenta os valores referentes ao coeficiente de absorção sonora obtido pela utilização dos tubos de impedância de baixa frequência – diâmetros de 100. O procedimento levou em consideração as diretrizes da norma ASTM E1050 (2012) com utilização de dois microfones pelo método da função de transferência.

Figura 18 – Coeficientes de Absorção sonora para cana de açúcar de espessura de 20, 30 e 40mm



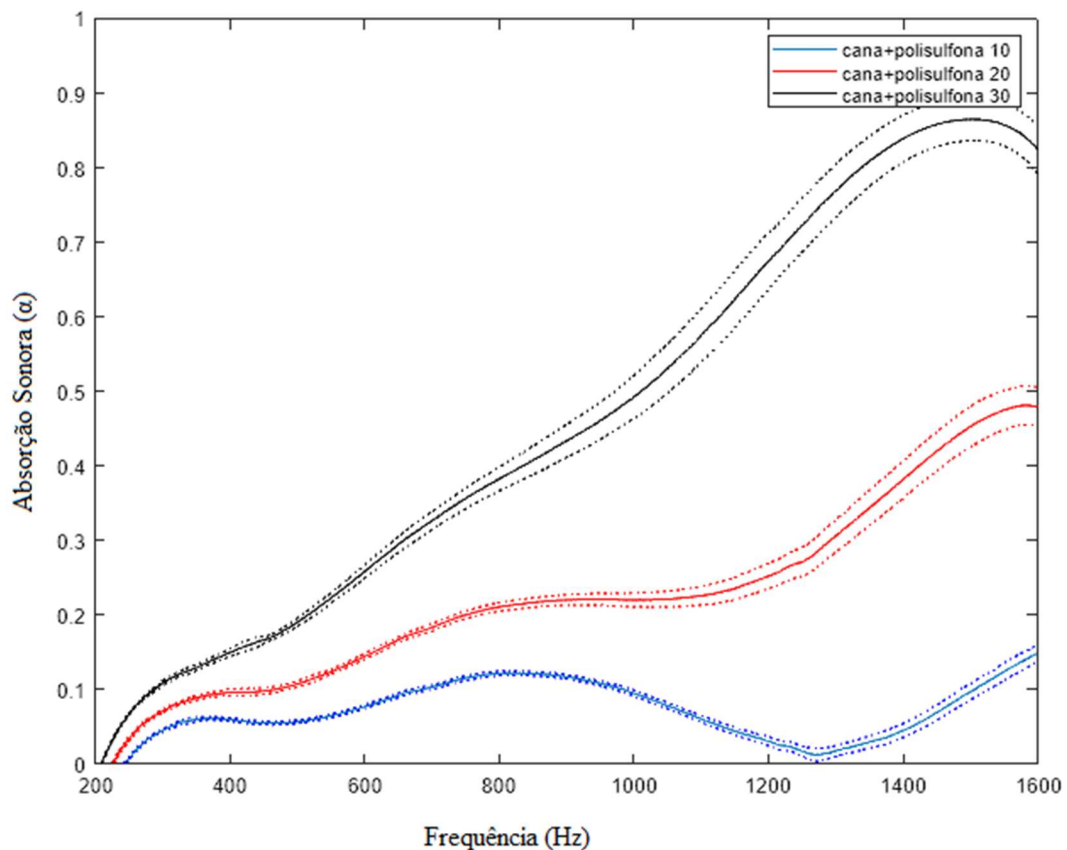
Fonte: Bittencourt *et. al*, 2019.

A Figura 18 apresenta os dados coletados por Bittencourt *et.al* (2019), nos quais foi utilizada a fibra natural da cana de açúcar. Os dados que serão utilizados para comparação são das amostras de 20mm e 30mm (linhas cheias, azuis e vermelhas, respectivamente). Para efeitos de comparação, não foi possível encontrar na literatura amostras de 10mm de espessura que se enquadrassem no mesmo padrão de avaliação, densidade e tamanho de amostras.

6.2.1 Compósito de cana de açúcar e polisulfona

A Figura 19 traz três diferentes espessuras (10, 20 e 30 mm) para a mesma relação fibra, polímero e cola de materiais empregados na fabricação das amostras – em média 8g de fibra para 8g de polisulfona para 4g de cola. A densidade média calculada e apresentada na Tabela 1 aponta o valor médio igual 212,38 kg/m³, com desvio padrão de 17,78 kg/m³.

Figura 19. Coeficiente de absorção sonora das amostras de cana-de-açúcar com polisulfona



Fonte: O autor, 2023.

Comparando com os resultados apresentados por Bittencourt *et.al* (2019) (ver Figura 18), houve uma queda na absorção sonora das amostras, tanto nas amostras de 20 mm quanto nas de 30 mm. Além disso, não houve mudança no padrão das curvas nem nos picos de absorção em relação à frequência. Em relação à amostra de 10mm, pode-se notar uma baixa absorção em todo o processo, demonstrando que o aumento da espessura realmente tem um papel muito importante na capacidade de absorção sonora.

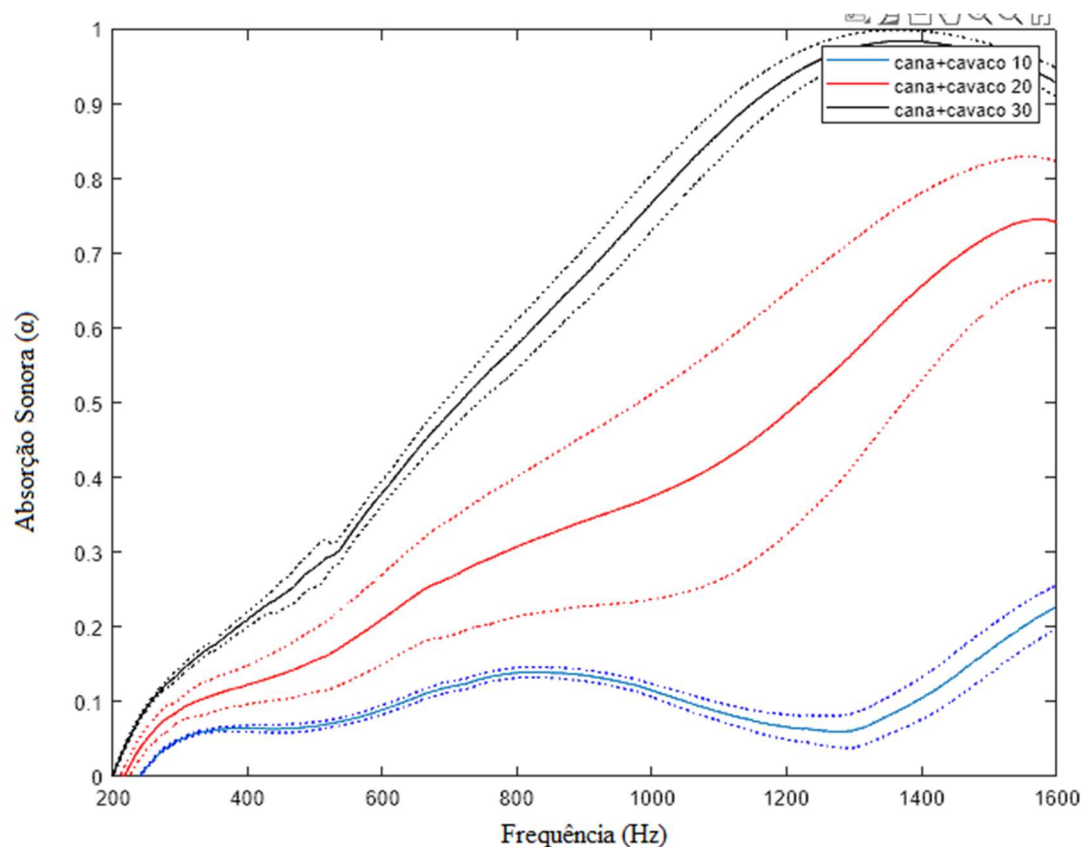
Embora esses três conjuntos de resultados sugiram o deslocamento do pico da absorção sonora, além de um aumento da absorção em função da espessura adotada para dado espectro de frequência, as curvas, de maneira geral, apontam para uma mesma tendência.

Pode-se observar que o desvio-padrão das amostras se encontra em um nível muito bom, demonstrando que, apesar do resultado um pouco abaixo das amostras, em comparação com as amostras feitas apenas de cana de açúcar, a manufatura das mesmas pode ser reproduzida facilmente e sem grandes diferenças entre as amostras.

6.2.2 Compósito de cana de açúcar e Poliacetal

A Figura 20 traz três diferentes espessuras (10, 20 e 30 mm) para a mesma relação fibra, polímero e cola de materiais empregados na fabricação das amostras – em média 8g de fibra para 8g de poliacetal para 4g de cola. A densidade média calculada e apresentada na Tabela 1 aponta o valor médio igual $197,76 \text{ kg/m}^3$, com desvio padrão de $15,31 \text{ kg/m}^3$.

Figura 20. Coeficiente de absorção sonora das amostras de cana-de-açúcar com poliacetal



Fonte: O autor, 2023.

Comparando com os resultados apresentados por Bittencourt *et.al* (2019) (ver Figura 18), a absorção sonora das amostras tanto nas amostras de 20 mm quanto nas de 30 mm se manteve constante e igual. Além disso, não houve mudança nos padrões das linhas nem nos picos de absorção em relação à frequência. Em relação à amostra de 10mm, nota-se uma baixa absorção em todo o processo, porém com uma grande melhoria em relação ao compósito feito com polisulfona.

Esses três conjuntos de resultados sugerem e ajudam a confirmar que o deslocamento do pico da absorção sonora, além de um aumento da absorção em função da espessura adotada.

Também é válido notar que os desvios-padrão das amostras não são tão grandes, e que a possibilidade de reprodução de resultados pode ser feita facilmente se as misturas dos ingredientes forem feitas da maneira correta.

6.2.3 Compósito de cana de açúcar e Poliestireno

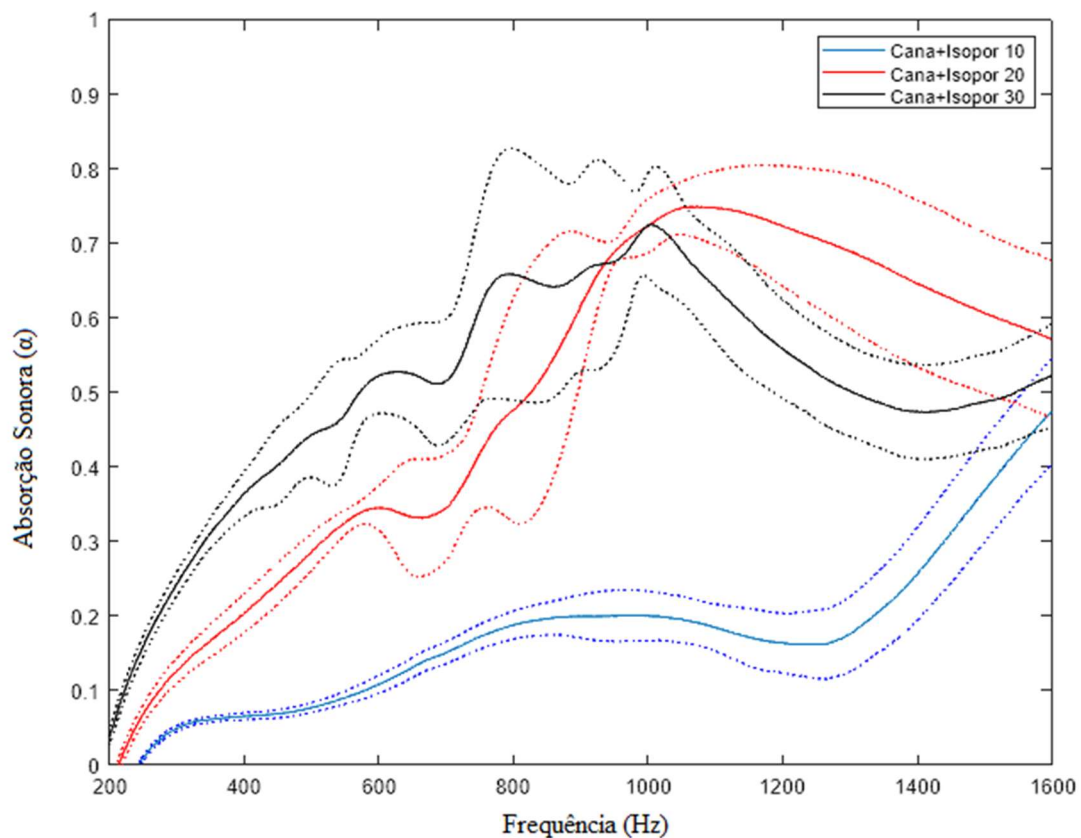
A Figura 21 traz três diferentes espessuras (10, 20 e 30 mm) para a mesma relação fibra, polímero e cola de materiais empregados na fabricação das amostras – em média, 8g de fibra para 8g de poliestireno para 4g de cola. A densidade média calculada e apresentada na Tabela 1 aponta o valor médio igual 198,52 kg/m³, com desvio padrão de 13,10 kg/m³.

Ao comparar com os resultados apresentados por Bittencourt et al. (2019) (ver Figura 18), observa-se uma redução na absorção sonora máxima das amostras tanto nas de 20 mm quanto nas de 30 mm. No entanto, o aumento da absorção sonora em frequências muito baixas (400-800 Hz) é uma descoberta interessante, possivelmente associada ao poliestireno. Além disso, houve uma mudança nos padrões das linhas e nos picos de absorção em relação à frequência das amostras sem nenhum polímero e das amostras com outros polímeros, o que indica que, dependendo do polímero escolhido, podem ocorrer modificações nos padrões de comportamento das linhas de absorção sonora. Portanto, não apenas a espessura pode influenciar o pico, mas também o tipo de polímero utilizado para o compósito. Em relação à amostra de 10 mm, nota-se um pequeno ganho de absorção em todo o processo, com um aumento significativo na faixa de 1400 até 1600 Hz, o que pode indicar uma boa solução quando há pouco espaço disponível para um material de absorção.

Esses três conjuntos de resultados foram os mais interessantes devido à mudança no padrão de comportamento da absorção sonora. Nos testes anteriores, não havia variações significativas na absorção sonora à medida que a frequência aumentava, mas com o poliestireno, observou-se essa modificação. Poderia ser considerado uma anomalia da amostra, mas, como evidenciado pelo desvio-padrão, todas as amostras seguem esse mesmo padrão, indicando que a absorção sonora desse compósito tende a ser assim.

Também é importante notar que os desvios-padrão das amostras são inferiores a 10% entre elas, e a reprodução de resultados pode ser facilmente realizada se as misturas dos ingredientes seguirem o mesmo padrão. No entanto, é preciso mencionar que essas amostras apresentaram o maior desvio-padrão de todos, embora não seja muito grande. Isso pode ser resultado da dificuldade em obter uma mistura homogênea entre a cana, o poliestireno e a cola branca.

Figura 21. Coeficiente de absorção sonora das amostras de cana-de-açúcar com poliestireno



Fonte: O autor, 2023.

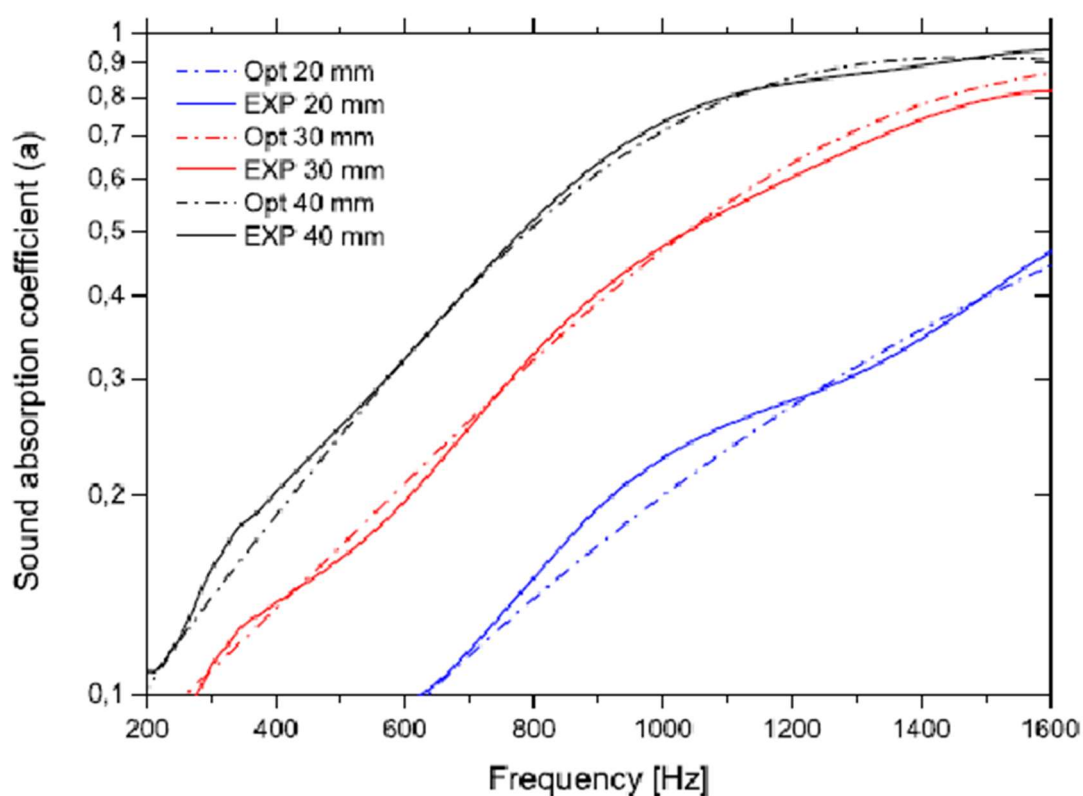
6.2.4 Considerações gerais sobre os compósitos de cana de açúcar

Os compósitos, em geral, não apresentaram um ganho significativo de absorção em comparação com as amostras compostas de apenas cana de açúcar, exceto por pequenos aumentos em frequências muito baixas no caso do compósito de cana de açúcar e poliestireno. No entanto, é importante destacar que com a adição do poliacetal não resultou em perda de absorção acústica, o que sugere uma possível solução para o descarte do polímero no meio industrial, além de proporcionar uma maior abrangência de frequências com a utilização do poliestireno. Apenas o polisulfona não apresentou nenhuma melhoria, pelo contrário, mostrou uma redução na capacidade de absorção sonora da amostra. Isso pode ser atribuído à granulometria da polisulfona, mas seria necessário um estudo mais aprofundado para confirmar essa hipótese.

6.3 ANÁLISE 2 – COMPÓSITOS DO COCO

Esse conjunto de resultados, assim como o anterior, foi analisado e apresenta os valores referentes ao coeficiente de absorção sonora obtido pela utilização dos tubos de impedância de baixa frequência – diâmetros de 100mm.

Figura 22 – Coeficientes de Absorção sonora para coco de espessura de 20, 30 e 40mm



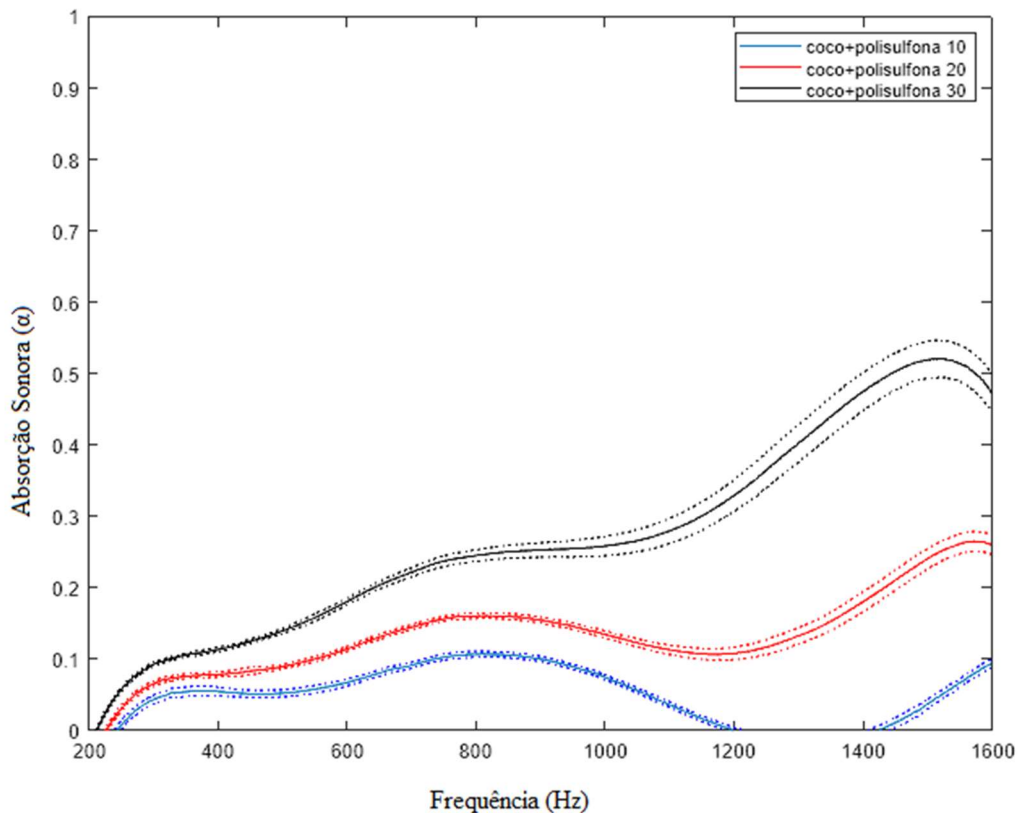
Fonte: Bittencourt *et. al*, 2019.

A Figura 22 apresenta os dados coletados por Bittencourt *et.al* (2019). Foram utilizados a fibra natural do coco. Os dados que serão utilizados para comparação são as amostras de 20mm e 30mm (Linhas cheias, azuis e vermelhas respectivamente). Para fins comparativos, não foi possível encontrar na literatura as amostras de 10mm de espessura para comparação que se encaixassem no mesmo padrão de avaliação, densidade e tamanho de amostras.

6.2.1 Compósito de coco e polisulfona

A Figura 23 traz três diferentes espessuras (10, 20 e 30 mm) para a mesma relação fibra, polímero e cola de materiais empregados na fabricação das amostras – em média 8g de fibra para 8g de polisulfona para 4g de cola. A densidade média calculada e apresentada na Tabela 1 aponta o valor médio igual 211,34 kg/m³, com desvio padrão de 10,55 kg/m³.

Figura 23. Coeficiente de absorção sonora das amostras de coco com polisulfona



Fonte: O autor, 2023.

Comparando com os resultados apresentados por Bittencourt *et.al* (2019) (ver Figura 22), houve uma queda considerável na absorção sonora das amostras, tanto nas amostras de 20 mm, quanto nas de 30 mm. Além disso, pode-se observar uma mudança no padrão das linhas em relação à frequência. Em relação à amostra de 10mm, nota-se uma baixa absorção em todo o processo, demonstrando que o aumento da espessura realmente desempenha um papel crucial na capacidade de absorção sonora.

Esses três conjuntos de resultados apontam para uma mesma tendência de padrão nas linhas de absorção sonora.

As baixas absorções das amostras levam a crer que uma granulometria alta do polímero, em conjunto com o estilo mais alongado das fibras de coco, culminou em um compósito de baixa absorção sonora, devido ao grande espaço entre as fibras e o polímero.

É possível notar o desvio-padrão das amostras se encontra em um nível muito bom, demonstrando que, apesar do resultado abaixo do esperado das amostras, a reprodutibilidade delas é de fácil execução.

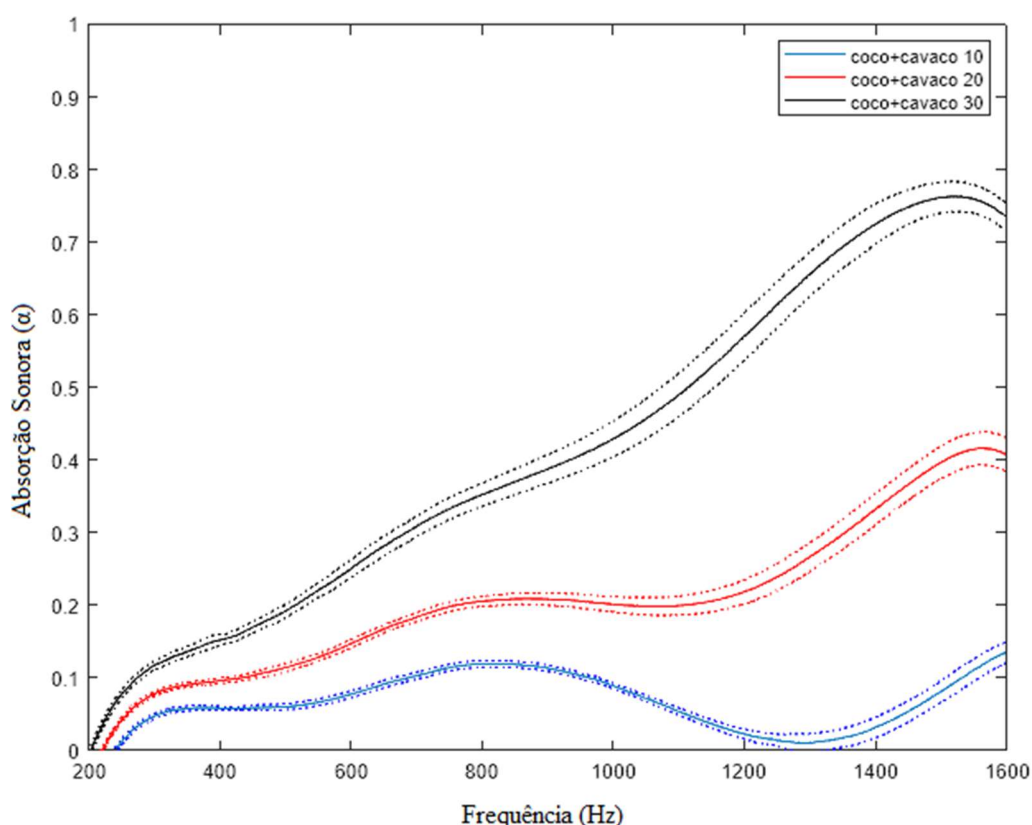
6.2.2 Compósito de coco e Poliacetal

A Figura 24 apresenta três diferentes espessuras (10, 20 e 30 mm) para a mesma relação fibra, polímero e cola de materiais empregados na fabricação das amostras – em média 8g de fibra para 8g de poliacetal para 4g de cola. A densidade média calculada e apresentada na Tabela 1 aponta o valor médio igual 205,33 kg/m³, com desvio padrão de 10,16 kg/m³.

Ao comparar com os resultados apresentados por Bittencourt *et.al* (2019) (ver Figura 22), a absorção sonora das amostras, tanto nas amostras de 20 mm, quanto nas de 30 mm, teve um leve ganho de absorção sonora em alguns pontos de frequência e, em outros, manteve-se estável. A parte mais relevante é que, com a adição do poliacetal, começou a surgir absorção sonora na faixa de 200-600 Hz, onde antes não existia. Além disso, observou-se que, com a adição do polímero, o pico de absorção moveu-se um ligeiramente para a esquerda em relação às amostras sem polímero. Em relação às amostras de 10mm, observa-se uma baixa absorção em todo o processo.

Por fim, é válido notar que os desvios-padrão das amostras não são dos menores até agora, o que demonstra a possibilidade de reprodução dos resultados se as misturas dos ingredientes forem feitas corretamente e a grande compatibilidade entre os materiais, o que facilita a manufatura das amostras.

Figura 24. Coeficiente de absorção sonora das amostras de coco com poliacetal



Fonte: O autor, 2023.

6.2.3 Compósito de coco e Poliestireno

A Figura 25 traz três diferentes espessuras (10, 20 e 30 mm) para a mesma relação fibra, polímero e cola de materiais empregados na fabricação das amostras – em média 8g de fibra para 8g de poliestireno para 4g de cola. A densidade média calculada e apresentada na Tabela 1 aponta o valor médio igual 185,09 kg/m³, com desvio padrão de 16,11 kg/m³.

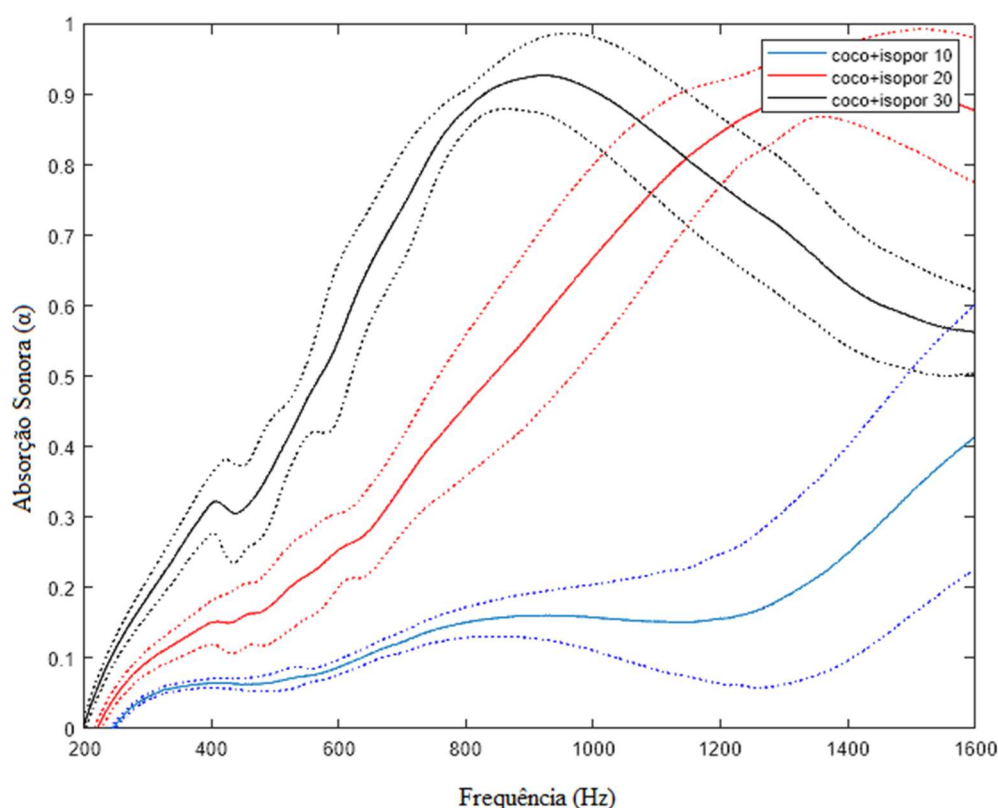
Comparando com os resultados apresentados por Bittencourt *et.al* (2019) (ver Figura W), a absorção sonora das amostras, tanto nas amostras de 20 mm, quanto nas de 30 mm, obteve uma queda na absorção sonora máxima das amostras em alguns pontos. No entanto, em algumas frequências, teve um grande aumento dela. Possivelmente, o que pode ter ocorrido, foram que os picos de absorção com a adição do poliestireno acabaram por se mover para frequências mais baixas, o que indica que não apenas a espessura pode movê-los, mas com a adição de certos polímeros esses picos podem ser movidos ainda mais. Novamente, quando foi adicionado poliestireno à cana de açúcar, nessas amostras

de coco foram percebidos o aumento da absorção sonora em frequências muito baixas (400-800 Hz), o que pode reforçar a teoria que pode ser associado ao poliestireno. Além do mais, aqui também houve mudança no padrão das linhas e nos picos de absorção, em relação a frequência das amostras sem nenhum polímero e dos outros polímeros, reforçando o indicativo de que, dependendo do polímero escolhido, podemos ter modificações dos padrões de comportamentos das linhas de absorção sonora. Em relação as amostras de 10mm, pode-se notar um pequeno ganho de absorção em todo o processo, tendo um aumento grande na faixa de 1400 até 1600 Hz, o que pode indicar uma boa solução quando se tem pouco espaço para um material de absorção.

Esses três conjuntos de resultados foram muito interessantes que apesar de possuir as mudanças do padrão observadas no compósito de cana de açúcar e poliestireno, as mudanças não foram tão drásticas como nas amostras mencionadas anteriormente. Novamente, poderia ser considerado uma anormalidade da amostra, mas como pode ser visto no desvio-padrão, todas seguem esse mesmo padrão, o que indica que a absorção sonora desse estilo de compósito tende a realmente ser assim.

Também é valido notar que os desvio-padrão das amostras não são ainda menores do que os compósitos de cana de açúcar e poliestireno, e que a possibilidade de reprodução de resultados pode ser facilmente alcançada se as misturas dos ingredientes forem feitas de maneira correta e seguirem o mesmo padrão. Pode-se perceber que o poliestireno se combina muito melhor com a fibra de coco do que com a de cana, e que obtemos resultados muito mais confiáveis nesse caso.

Figura 25. Coeficiente de absorção sonora das amostras de coco com poliestireno



Fonte: O autor, 2023.

6.2.4 Considerações gerais sobre os compósitos de coco

Os compósitos feitos com polisulfona apresentaram uma perda de absorção sonora, enquanto os compostos feitos com poliacetal geraram leves ganhos de absorção sonora geral. Por sua vez, o compósito feito com poliestireno demonstrou ganhos consideráveis de absorção sonora, especialmente nas frequências mais baixas (200-1000 Hz) forem serem levadas em maior consideração. Portanto, a adição dos polímeros de poliacetal e poliestireno geraram um ganho considerável de absorção sonora, além de darem uma destinação a esses materiais poliméricos que ao contrário seriam jogados na natureza. Apenas o polisulfona não demonstrou nenhum tipo de melhoria, pelo contrário, demonstrou uma redução na capacidade de absorção sonora da amostra. Talvez isso se deva à granulometria encontrada da polisulfona, mas seria necessário um estudo mais aprofundado para confirmar essa hipótese. Além disso, como os resultados foram piores com a fibra de coco, tudo indica que a compatibilidade dos materiais do compósito influencia diretamente na eficiência do mesmo.

CAPÍTULO 7

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação, foram medidos e analisados os resultados para o coeficiente de absorção sonora dos compósitos de fibras naturais com polímeros. As fibras escolhidas de cana-de-açúcar e casca de coco e os polímeros escolhidos sendo Polisulfona, poliacetal e poliestireno. Os resultados foram gerados pelo Método da Função de Transferência no tubo de impedância com 100 mm de diâmetro seguindo as normas ASTM E1050-10 (2012).

Para todos os materiais, entende-se que o aumento da espessura contribui para melhores absorções em frequência menores

Na primeira análise, foram consideradas as proporções de fibra de cana de açúcar, cada tipo de polímeros e cola separadamente nos tubos de baixa frequência. Ao analisá-las, notou-se que a cana de açúcar teve pouco ganho da adição do polímero, sendo polisulfona prejudicial a amostra, poliacetal não tendo muitos efeitos notáveis e com a adição do poliestireno tendo um ganho pequeno em frequências mais baixas (200-1000 Hz) e com pouca diferença no resto do espectro (1000-1600 Hz). Isso sugere que, embora não apresente melhorias significativas, pode ser uma opção para a reciclagem desses materiais e um possível alternativa caso seja necessária uma resolução de absorção para uma frequência específica.

Na segunda análise, foram consideradas as proporções de fibra de coco, bem como cada tipo de polímeros e cola separadamente nos tubos de baixa frequência. Ao analisá-las, percebeu-se um aumento na absorção com dois dos três polímeros. Sendo o polisulfona o material que causou perda de absorção sonora das amostras em relação a uma amostra apenas de coco. Em relação ao poliacetal, houve um leve ganho de absorção e em relação ao poliestireno houve um ganho considerável em toda a gama do espectro da frequência. É importante notar que houve um deslocamento do pico de absorção para frequências mais baixas quando o poliestireno foi utilizado.

As experiências enfrentaram várias dificuldades em todo o processo, tanto na área de obtenção dos materiais, a manufatura das amostras, coleta e análise dos dados. Quando colocados em comparação com outros estudos, resultaram em leves diferenças, evidenciando a sensibilidade dos estudos de absorção sonora.

A utilização de compósitos na área de absorção acústica pode ser uma solução para a reutilização de materiais, que de outra maneira, iriam acabar sendo jogados fora. Muitas soluções podem até ser mais eficientes em resolver problemas acústicos e ainda reciclar esses materiais. O poliacetal e o poliestireno podem ser aliados nesse processo, melhorando a absorção acústica com materiais recicláveis, enquanto o polisulfona pode ter suas utilizações, porém, no estado granulométrico que estava, não gerou resultados satisfatórios.

RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para futuras pesquisas, podem ser sugeridos os seguintes pontos:

- Estudo da relação granulométrica das fibras e dos polímeros com a absorção acústica;
- Medir experimentalmente a porosidade para os compósitos;
- Analisar a influência térmica do compósito;
- Aplicar outros tipos de aglutinadores na fabricação das amostras;
- Realizar o estudo de resistividade ao fluxo das amostras.

REFERÊNCIAS

Acoustics: sound fields and transducers. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=VYvS7MyaEE8C&oi=fnd&pg=PP2&dq=beranek+2012&ots=glEoHoFOTy&sig=t_iWTvQj8TXQzK9wDmG6amaf1Qc&redir_esc=y#v=onepage&q=beranek%202012&f=false.

ALLARD, J. F., ATALLA, N., **“Propagation of Sound in Porous Media – Modeling Sound Absorbing Materials,”** Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, (2009).

ALLARD, J. F., CHAMPOUX, Y., **“New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials,”** Journal of the Acoustic Society of America, vol. 91, pp. 3346 – 3353, (1992).

ALLARD, J. F., CHAMPOUX, Y., DEPOLLIÉ, C., **“Modelization of layered sound absorbing materials with transfer matrices,”** Journal of the Acoustic Society of America, vol. 82, pp. 1792 – 1796, (1987).

ASDRUBALI, Francesco; SCHIAVONI, Samuele; HOROSHENKOV, Kirill V. **“A review of sustainable materials for acoustic applications.”** Building Acoustics, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 283–311, 2012.

ASTM E1050-10, **“Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and Digital Frequency Analysis System”**, American Society of Testing Materials, (2012).

BERARDI, U., IANNACE, G., **“Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications.”** Building and Environment, v. 94, pp. 840 – 852, (2015).

BHUVANESWARI, V.; BALAJI, Dhanapal; ARULMURUGAN, B.; MAHENDRAN, R.; RAJKUMAR, S.; SHARMA, Shubham; MAUSAM, Kuwar; LI, Changhe; ELDIN, Elsayed Tag. **“A Critical Review on Hygrothermal and Sound Absorption Behavior of Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites.”** Polymers, [S. l.], v. 14, n. 21, p. 4727, 2022.

BITTENCOURT, C. C. S., **“Avaliação do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes naturais para baixa frequência com três métodos.”** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, (2018).

BITTENCOURT, C. C. S., TERASHIMA, F. J. H., BARBIERI, N., LIMA, K. F., **“Sound absorption coefficient assessment of sisal, coconut husk and sugar cane fibers for low frequencies based on three different methods.”** Applied Acoustics, vol. 156, pp. 92 – 100, (2019).

BOTTERMAN, Bram; DE LA GRÉE, G. C. H. Doudart; HORNIKX, Maarten; YU, Qingliang; BROUWERS, Hjh Jos. **“Modelling and optimization of the sound**

absorption of wood-wool cement boards.” Applied Acoustics, [S. l.], v. 129, p. 144–154, 2018.

BROWN, R. L., BOLT, R. H., **“The measurement of flow resistance of porous acoustic materials”**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 13, pp. 337-344, (1942).

CAO, L., QIUXIA F., YANG S., BIN D., JIANYONG Y., **“Porous materials for sound absorption”**. Composites Communications, vol. 10, pp. 25 – 35, (2018).

CASTAGNEDE, B., AKNINE, A., BROUARD, B., TARNOW, V., **“Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials.”** Applied Acoustics, vol. 61, pp. 173 – 182, (2000).

CHANLERT, Purintorn; TONGYOO, Sukrutai; RORDRAK, Chintaporn. **“Effects of urea–formaldehyde and polyvinyl acetate adhesive on sound absorption coefficient and sound transmission loss of palmyra palm fruit fiber composites.”** Applied Acoustics, [S. l.], v. 198, p. 108984, 2022.

CHEEWAWUTTIPONG, Watthanaphon. **“PROPERTIES OF REINFORCED POLYMER COMPOSITE PRODUCED FROM COCONUT FIBER.”** 2021. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/3111>.

CHUNG, J. Y., BLASER, D. A., **“Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties: I. Theory, II. Experiment,”** Journal of the Acoustical Society of America, vol. 68, pp. 907 – 921, (1980).

COX, Trevor J.; D’ANTONIO, Peter. **Acoustic absorbers and diffusers.**

DEL REY TORMOS, Romina; CARBÓ, Laura Bertó; FERNÁNDEZ, Jesús Alba; ARENAS, Jorge P. **“Acoustic characterization of recycled textile materials used as core elements in noise barriers.”** Noise Control Engineering Journal, [S. l.], v. 63, n. 5, p. 439–447, 2015.

DELANY, M. E. and BAZLEY, E. N., **“Acoustical properties of fibrous absorbent materials,”** Applied Acoustics, vol. 3, pp. 105-116, (1970).

DOUTRES, Olivier; ATALLA, Noureddine; OSMAN, Haisam. **“Transfer matrix modeling and experimental validation of cellular porous material with resonant inclusions.”** Journal of the Acoustical Society of America, [S. l.], v. 137, n. 6, p. 3502–3513, 2015.

DUPONT, Thomas; LECLAIRE, Philippe; PANNETON, Raymond; UMNOVA, Olga. **“A microstructure material design for low frequency sound absorption.”** Applied Acoustics, [S. l.], v. 136, p. 86–93, 2018.

ECHEVERRIA, Claudia A.; PAHLEVANI, Farshid; HANDOKO, Wilson; JIANG, Chaoyang; DOOLAN, Con J.; SAHAJWALLA, Veena. **“Engineered hybrid fibre**

reinforced composites for sound absorption building applications.” Resources Conservation and Recycling, [S. l.], v. 143, p. 1–14, 2019.

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

FESINA, Michael I.; KRASNOV, A. V.; ГОПИНА, Л. Н. **“The Effectiveness of the Suppression of Low Frequency Acoustic Resonances with Porous Sound Absorbing Structures of Multifunctional Upholstery Materials of Car Body Interior.”** Procedia Engineering, [S. l.], v. 176, p. 159–168, 2017.

FOULADI, M. H., AYUB, M., NOR, M. J. M., **“Analysis of coir fiber acoustical characteristics”**, Applied Acoustics, vol. 72, pp. 35-42, (2011).

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

GERGES, S. N. Y. **“Ruído: fundamentos e controle.”** 2ª Edição, NR Editora, (2000).

GLÉ, Philippe; GOURDON, Emmanuel; ARNAUD, Laurent. **“Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity.”** Applied Acoustics, [S. l.], v. 72, n. 5, p. 249–259, 2011.

GOKULKUMAR, S.; THYLA, P. R.; PRABHU, L.; SATHISH, S. **“Measuring Methods of acoustic properties and influence of physical parameters on natural fibers: a review.”** Journal of Natural Fibers, [S. l.], v. 17, n. 12, p. 1719–1738, 2019.

JAYAMANI, Elammaran; HAMDAN, Sinin. **“Sound absorption coefficients natural fibre reinforced composites.”** Advanced Materials Research, [S. l.], v. 701, p. 53–58, 2013.

JAYAMANI, Elammaran; HAMDAN, Sinin; RAHMAN, Rezaur; BAKRI, Muhammad Khusairy Bin; KAKAR, Akshay. **“An investigation of sound absorption coefficient on sisal fiber poly lactic acid bio-composites.”** Journal of Applied Polymer Science, [S. l.], v. 132, n. 34, p. n/a, 2015.

JONES, P. W., KESSISSOGLU., **“Simplification of the Delany-Bazley approach for modelling the acoustic properties of a poroelastic foam.”** Applied Acoustics, vol. 88, pp. 146 – 152, (2015).

KOMATSU Takeshi., **“Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials.”** The acoustic Sci & Technology, vol. 29, pp. 121-129, (2008)

KREYSZIG, E., **“Advanced Engineering Mathematics,”** 8th John Wiley & Sons, (1999).

KUTTRUFF, Heinrich, **“Room Acoustics,”** 6th Edition, 2016

LEGAT FILHO, N. L., **“Determinação da impedância acústica e do número de onda de placas finas de fibra de coco com quatro métodos experimentais de avaliação”**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, (2017).

LIM, Zhi Yih; PUTRA, Azma; NOR, Mohd Jailani Mohd; YAAKOB, Mohd Yuhazri. **“Sound absorption performance of natural kenaf fibres.”** Applied Acoustics, [S. l.], v. 130, p. 107–114, 2018.

LIMA, K. F.; BARBIERI, N. ; BARBIERI, R. ; TERASHIMA, F. J. H. ; ROSA, V. P., **“Evaluation of Dissipative Silencers Efficiency in Terms of its Sound Transmission Loss”**. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2015), 2015, Rio de Janeiro. 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM2015), 2015.

LIU, P. S., CHEN, G. F. **“Porous Materials – processing and applications”**. 1st Edition. Butterworth-Heinemann, (2014).

MAMTAZ, Hasina; FOULADI, Mohammad Hosseini; AL-ATABI, Mushtak; NAMASIVAYAM, Satesh. **“Acoustic absorption of natural fiber composites. Journal of Engineering,”** [S. l.], v. 2016, p. 1–11, 2016.

MARQUES, Diego Valdevino et al. **Recycled polyethylene terephthalate-based boards for thermal-acoustic insulation. Journal of Cleaner Production,** [S. l.], v. 189, p. 251–262, 2018.

MIKI, Y., **“Acoustical properties of porous materials – Modifications of Delany - Bazley models,”** Journal of the Acoustic Society of Japan, vol. 11, pp. 19 – 24, (1990).

MÖSER, M., **“Engineering acoustics: an introduction to noise control,”** 2 ed, Springer, (2009).

MUNJAL, M. L., **“Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design.”** 1st Edition, John Wiley & Sons, (1987).

NAIK, Venkatesh. **A review on natural fiber composite material in automotive applications.** 2021. Disponível em: <https://www.espublisher.com/journals/articledetails/589>.

NOR, M. J. M., JAMALUDIN, N., TAMIRI, F. M., **“A preliminary study of sound absorption using multi-layer coconut coir fibers.”** Electron J: Tech Acoustic, (2004).

OANCEA, Irina; BUJOREANU, Carmen; BUDESCU, Mihai; BENCHEA, Marcelin; GRĂDINARU, Cătălina Mihaela. **“Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements.”** Journal of Cleaner Production, [S. l.], v. 203, p. 301–312, 2018.

OLDFIELD, R., **“Improved membrane absorbers.”** Dissertação de Mestrado, University of Salford, (2006).

OTHMANI, C., TAKTAK, M., ZAIN, A., HANTATI, T., DAUCHEZ, N., ELNADY, T., FAKHFAKH, T., HADDAR, M., **“Acoustic characterization of a porous absorber based on recycled sugarcane wastes,”** Applied Acoustics, vol. 120, pp. 90 – 97, (2017).

PENG, Songguo; PAN, Jie. **Acoustical wave propagator for time-domain flexural waves in thin plates.** Journal of the Acoustical Society of America, [S. l.], v. 115, n. 2, p. 467–474, 2004.

PIERCE, John R. **“Periodicity and pitch perception.”** Journal of the Acoustical Society of America, [S. l.], v. 90, n. 4, p. 1889–1893, 1991.

SAVIOJA, Lauri; SVENSSON, U. Peter. **“Overview of geometrical room acoustic modeling techniques.”** Journal of the Acoustical Society of America, [S. l.], v. 138, n. 2, p. 708–730, 2015.

SCOTT, R. A., **“An apparatus for accurate measurement of the acoustic impedance of sound-absorbing materials,”** Physical Society, vol. 58, pp. 253 – 264, (1946).

Setyowati, Erni and Yahya, Iwan and Supriyo, Edi and C. Romadhona, Intan. **On the Sound Absorption Improvement of Water Hyacinth and Coconut Husk based Fiber Reinforced Polymer Panel.** In: 2nd IJCAET 2017 and ISAMPE 2017, 24-26 Agustus 2017.

SEYBERT, A. F., ROSS, D. F., **“Experimental determination of acoustic properties using two-microphone random-excitation technique,”** Journal of the Acoustic Society of America, vol. 61, pp. 1362 – 1370, (1977).

SEYBERT, A. F., SOENARKO, B., **“Errors analysis of spectral estimates with application to the measurements of acoustic parameters using random sound field in ducts,”** Journal of the Acoustic Society of America, vol. 69, pp. 1190 – 1199, (1981).

TERASHIMA, F. J. H., **“Caracterização das propriedades acústicas de materiais absorventes de pequenas espessuras com três métodos de avaliação.”** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, (2016).

YANG, Xiaocui; BAI, Panfeng; SHEN, Xinmin; TO, Suet; CHEN, Liang; ZHANG, Xiaonan; YIN, Qiang. **“Optimal design and experimental validation of sound absorbing multilayer microperforated panel with constraint conditions.”** Applied Acoustics, [S. l.], v. 146, p. 334–344, 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Especificação das amostras do compósito de Cana de açúcar e polisulfona

APÊNDICE B - Especificação das amostras do compósito de Cana de açúcar e poliacetal

APÊNDICE C - Especificação das amostras do compósito de Cana de açúcar e poliestireno

APÊNDICE D - Especificação das amostras do compósito de Coco e polisulfona

APÊNDICE E - Especificação das amostras do compósito de Coco e poliacetal

APÊNDICE F - Especificação das amostras do compósito de Coco e poliestireno

APÊNDICE A

Compósito: Cana de Açúcar e Polisulfona				
Número da Amostra	Peso (g)	Diametro (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)
1	16	96,58	10,97	199,09
2	18	98,81	10,44	224,84
3	18	97,16	10,94	221,92
4	18	99,30	10,11	229,90
5	17	97,26	10,81	211,67
6	18	95,97	10,54	236,09
7	17	95,69	10,58	223,43
8	16	97,53	10,59	202,24
9	16	99,15	11,43	181,30
10	17	99,27	11,36	193,35
			Média	212,38
			Desvio-padrão	17,78

Fonte: O Autor, 2023

APÊNDICE B

Compósito: Cana de Açúcar e Poliacetal				
Número da Amostra	Peso (g)	Diametro (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)
1	18	98,70	10,80	217,83
2	17	97,50	10,76	211,61
3	16	98,80	10,54	198,00
4	16	97,09	11,53	187,44
5	17	99,65	10,76	202,58
6	18	99,29	11,48	202,50
7	18	99,20	11,04	210,88
8	15	98,85	11,64	167,92
9	16	98,40	11,66	180,44
10	17	97,37	11,51	198,35
			Média	197,76
			Desvio-padrão	15,31

Fonte: O Autor, 2023

APÊNDICE C

Compósito: Cana de Açúcar e Poliestireno				
Número da Amostra	Peso (g)	Diametro (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)
1	15	99,04	11,10	175,41
2	18	99,21	10,83	215,00
3	17	98,65	11,08	200,74
4	18	100,43	11,47	198,10
5	17	100,08	11,17	193,47
6	17	99,23	11,26	195,22
7	18	99,70	10,74	214,68
8	18	99,72	10,82	213,01
9	17	100,14	11,02	195,87
10	17	99,51	11,90	183,69
			Média	198,52
			Desvio-padrão	13,10

Fonte: O Autor, 2023

APÊNDICE D

Compósito: Coco e Polisulfona				
Número da Amostra	Peso (g)	Diametro (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)
1	16	98,55	10,86	193,15
2	17	98,62	10,87	204,73
3	17	97,93	10,72	210,54
4	18	98,30	10,76	220,43
5	17	98,72	10,82	205,27
6	17	97,20	10,62	215,73
7	18	98,75	10,76	218,42
8	16	99,16	10,42	198,83
9	17	97,23	10,20	224,47
10	17	98,69	10,02	221,79
			Média	211,34
			Desvio-padrão	10,55

Fonte: O Autor, 2023

APÊNDICE E

Compósito: Coco e Poliacetal				
Número da Amostra	Peso (g)	Diametro (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)
1	17	99,10	10,50	209,90
2	17	98,68	11,52	192,95
3	17	99,07	11,49	191,94
4	18	98,14	11,00	216,32
5	18	98,61	11,73	200,93
6	18	97,92	11,54	207,13
7	18	98,60	11,38	207,15
8	19	99,35	11,40	214,99
9	19	98,67	11,35	218,93
10	17	99,70	11,28	193,05
			Média	205,33
			Desvio-padrão	10,16

Fonte: O Autor, 2023

APÊNDICE F

Compósito: Coco e Poliestireno				
Número da Amostra	Peso (g)	Diametro (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)
1	17	98,29	13,00	172,34
2	15	96,19	11,77	175,37
3	18	98,90	11,39	205,71
4	17	99,22	10,59	207,62
5	18	98,42	11,80	200,51
6	17	98,99	11,41	193,59
7	18	98,95	12,90	181,45
8	17	99,25	11,90	184,65
9	17	99,33	13,31	164,82
10	17	98,71	13,48	164,80
			Média	185,09
			Desvio-padrão	16,11

Fonte: O Autor, 2023