

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM

CLAUDIA CILENE BITTENCOURT DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA EM COMPÓSITOS
ECOAMIGAVEIS FABRICADOS COM FIBRAS NATURAIS E POLIURETANO**

CURITIBA
Dezembro – 2024

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM

CLAUDIA CILENE BITTENCOURT DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA EM COMPÓSITOS
ECOAMIGAVEIS FABRICADOS COM FIBRAS NATURAIS E POLIURETANO**

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

Orientador: Prof. Dr. Key Fonseca de Lima

Coorientador: Prof. Dr. Nilson Barbieri

CURITIBA
Dezembro – 2024

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

S586a
2024 Silva, Claudia Cilene Bittencourt da
Avaliação do coeficiente de absorção sonora em compósitos ecoamigáveis
fabricados com fibras naturais e poliuretano / Claudia Cilene Bittencourt da
Silva ; orientador: Key Fonseca de Lima ; coorientador: Nilson Barbieri. – 2024.
193 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba,
2024
Bibliografia: f. 186-187

1. Energia mecânica. 2. Poliuretano. 3. Controle de ruído. 4. Tubo de
impedância. 5. Função de transferência. 6. Avaliação experimental. I. Lima,
Key Fonseca de. II. Barbieri, Nilson. III. Pontifícia Universidade Católica do
Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD 20. ed. – 620.1



Pontifícia Universidade Católica do Paraná –PUCPR
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM

TERMO DE APROVAÇÃO

Claudia Cilene Bittencourt da SILVA

Avaliação do Coeficiente de Absorção Sonora em Compósitos Eco Amigáveis Fabricadas com Fibras Naturais e Poliuretano

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

Documento assinado digitalmente
PAULO ROGERIO NOVAK
Data: 16/12/2024 12:19:53-0300
Verifique em <https://validar.jli.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Rogério NOVAK
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Pato Branco, Relator

Documento assinado digitalmente
ALEXANDRE AUGUSTO PESCADOR SARDÁ
Data: 18/12/2024 11:09:49-0300
Verifique em <https://validar.jli.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Augusto Pescador SARDÁ
Universidade Federal do Paraná, UFPR

Documento assinado digitalmente
JOSÉ ANTONIO ANDRÉS VELÁSQUEZ ALEGRE
Data: 06/02/2025 08:56:49-0300
Verifique em <https://validar.jli.gov.br>

Prof. Dr. José Antônio Andrés Velásquez ALEGRE
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR

Documento assinado digitalmente
NILSON BARBIERI
Data: 06/02/2025 10:28:38-0300
Verifique em <https://validar.jli.gov.br>

Prof. Dr. Nilson BARBIERI
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR, coorientador

Documento assinado digitalmente
KEY FONSECA DE LIMA
Data: 06/02/2025 10:32:41-0300
Verifique em <https://validar.jli.gov.br>

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

Curitiba, 06 de dezembro de 2024

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nunca desamparou-me quando clamei por ele, permitindo-me viver com saúde suficiente para seguir na minha missão.

A Jesus, que sempre segurou as minhas mãos nos momentos mais difíceis, ajudando-me a superar as provas e aquecendo meu coração com momentos de felicidade.

Aos meus pais, que, mesmo estando longe, sempre acreditaram em mim, apoiando-me com suas orações para que tudo fluísse de maneira contínua e assertiva.

Ao meu companheiro Cristian Emmerick e à sua família, que estiveram presentes em todos os momentos, ajudando-me a ser mais paciente e assertiva nas decisões mais importantes.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Key Fonseca de Lima, por todas as orientações, ensinamentos, ajudas e contribuições, por acreditar no meu trabalho, pela oportunidade de ingressar no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), mesmo sendo arquiteta de formação, além de sua paciência.

Ao estimado Prof. Dr. Nilson Barbieri, que, além da companhia nos cafés e almoços, trouxe a sua excelência nas orientações e ensinamentos, apoiando-me nos momentos em que quase deixei de acreditar que seria possível. Minha gratidão é imensurável.

Aos amigos do PPGEM, Ana, Mayara, Marcos, Jun, Jacqueline, Lucas, Silvana, Márcia, Philippe, Isabela, Lucas, Marlon, Nelson, que sempre me apoiaram, contribuindo de forma direta e indireta com seus conhecimentos. Além de sua companhia nas conversas descontraídas nas horas mais apropriadas e agradáveis junto ao grupo do Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) nos cafés e almoço.

Ao PPGEM, por todo apoio financeiro nos Congressos.

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

“A sabedoria é provada justa pelas suas obras.”

(Jesus de Nazaré)

RESUMO

O controle do ruído é comumente tratado com materiais que possuem alta eficiência na absorção sonora. Esses produtos são facilmente encontrados no mercado, tais como: espumas, lã de rocha e lã de vidro. A produção e o descarte desses materiais exigem um alto consumo de energia incorporada para tais operações, explorando recursos naturais de forma agressiva. Para que esses insumos sejam reaproveitados, devem passar por uma reciclagem mecanizada, e com isso, obtêm outras destinações ou a mesma função, porém com menor qualidade. Na contemporaneidade, pesquisas são voltadas para materiais de origem natural, a fim de mitigar os impactos ambientais no fim da sua vida útil. Na construção civil, tanto o conforto acústico quanto a necessidade da utilização de matérias primas amigáveis ao meio ambiente têm sido uma grande preocupação entre arquitetos e engenheiros. As fibras naturais juntamente com o Poliuretano de poliálcool de cana-de-açúcar (PUCA) vêm sendo foco de estudos no tratamento do ruído e, conseqüentemente, na redução dos efeitos negativos para a natureza. O uso da fibra natural, tal como da fibra de cana-de-açúcar, fibra da casca do coco e fibra do sisal concomitantemente com PUCA como material acústico pode permitir resultados satisfatórios como absorvedores sonoros em superfície. Os resultados são semelhantes aos dos produtos de origem petroquímica, porém menos invasivos ao meio ambiente. Além disso, a extração dessas matérias primas, diferentemente dos materiais petroquímicos, é de baixo impacto ambiental. Quanto ao descarte, as fibras possuem tempo determinado de decomposição, enquanto que a espuma de PUCA poderá ser reutilizada na construção civil. Para esta tese, foram produzidas amostras de fibras naturais de coco (FCC), cana (FCN) e sisal (FSS), com espessura aproximada de 10mm, para serem fixadas a uma camada de espuma de PUCA com espessura de 5mm. Para atenuar a vibração nos poros das amostras e otimizar os resultados, foram utilizados alfinetes na superfície da parte espumosa das amostras. Os métodos experimentais utilizados foram da função de transferência (ASTM 1050) e resistividade ao fluxo ambos em tubo de impedância. As faixas de frequências analisadas foram as de 100 a 1600 Hz e 400 a 6400Hz. Os métodos analíticos a serem confrontados foram os de Delany/Bazley (1970) e Champoux/Allard (1991). Os resultados alcançados demonstraram que as faixas de frequência de 500Hz à 1000Hz atingiram melhores resultados em ambos os métodos experimentais.

Palavras-chaves: *Avaliação experimental; função de transferência; PU de cana-de-açúcar; duas camadas; tubo de impedância.*

ABSTRACT

Noise control is commonly addressed with materials that have high sound absorption efficiency. These products are readily available on the market, such as foams, rock wool, and glass wool. The production and disposal of these materials require high energy consumption for such operations, exploiting natural resources in an aggressive manner. To recycle these materials, they must undergo mechanized recycling, resulting in other uses or the same function but with reduced quality. Currently, research is focused on natural origin materials to mitigate environmental impacts at the end of their life cycle. In the construction industry, both acoustic comfort and the need for eco-friendly raw materials have been significant concerns for architects and engineers. Natural fibers, along with sugarcane-based polyurethane (PUCA), are the focus of studies on noise treatment and consequently on reducing negative environmental effects. The use of natural fibers, such as sugarcane fiber, coconut husk fiber, and sisal fiber, used in conjunction with PUCA as an acoustic material, can provide satisfactory results as sound absorbers on surfaces. The results are similar to petrochemical-based products but are less invasive to the environment. Additionally, the extraction of these raw materials, unlike petrochemical materials, has a lower environmental impact. Regarding disposal, fibers have a determined decomposition time, whereas PUCA foam can be reused in construction processes. For this doctoral work, samples of natural coconut fiber (FCC), sugarcane fiber (FCN), and sisal fiber (FSS) with an approximate thickness of 10mm were produced to be attached to a layer of PUCA foam with a thickness of 5mm. To mitigate vibrations in the pores of the samples and optimize results, pins were used on the surface of the foam part of the samples. The experimental methods used were transfer function (ASTM 1050) and flow resistivity, both in impedance tubes. Frequency ranges of 100 to 1600 Hz and 400 to 6400 Hz were analyzed for noise absorption. The analytical methods to be compared were Delany/Bazley (1970) and Champoux/Allard (1991). The results showed that the frequency ranges of 500 Hz to 1000 Hz achieved better results with both experimental methods.

Keywords: *Experimental evaluation; transfer function; sugarcane PU; two layers; impedance tube.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espuma de poros fechados e espuma de poros abertos.....	25
Figura 2: Estrutura global de um poliuretano.....	26
Figura 3: Cadeia convencional da produção de poliuretano.....	26
Figura 4: Reação da expansão e formação de poliuréia	27
Figura 5: Posição inicial e deslocamento de um fluido passante como onda sonora através de um elemento.....	32
Figura 6: Sistema de coordenadas cilíndricas em duto circular	36
Figura 7: Propagação sonora em duto circular com as linhas nodais como $m=2$ e $n=2$	39
Figura 8: Velocidade da partícula em tubo fechado.....	41
Figura 9: Representação das três frequências de Ressonância e duas de antirressonância	44
Figura 10: Medição das amostras de espessuras diferentes e densidade de 1200 kg/m^3	45
Figura 11: Modos de vibração em placas circulares.....	46
Figura 12: Estruturas de materiais porosos (a) e fibrosos (b)	47
Figura 13: Exemplo de material compósito reforçado com fibras	49
Figura 14: Esquema ilustrativo do aparato de Resistividade ao fluxo.....	52
Figura 15: Desenho esquemático da bancada de Medição de Tortuosidade	53
Figura 16: Aparato ou câmara de medição de porosidade	55
Figura 17: Sistema de medição de porosidade	56
Figura 18: Gráfico assintótico da câmara vazia de porosidade com volume de 157 cm^3	57
Figura 19: Mapa da concentração do plantio da cana-de-açúcar no Brasil na Região Sudeste	61
Figura 20: Maior produção de cana-de-açúcar em São Paulo.....	61
Figura 21: Usina Alto Alegre em Santo Inácio (SP).....	62
Figura 22: Gráfico das etapas de transformação da cana-de-açúcar em seus insumos.....	63
Figura 23: Dados da plantação de coco no Brasil	65
Figura 24: Plantio de coco no Brasil.....	65
Figura 25: Fibra da casca de coco.	66
Figura 26: (a)Trabalhador colhendo sisal; (b) desfibradora para extração da fibra do sisal.	67
Figura 27: Dados IBGE sobre a produção de sisal no Brasil.....	67

Figura 28: Em (a), o plantio de grãos de milho no Paraná. Em (b), a produção a nível nacional do milho	68
Figura 29: A palha usada como matéria-prima para produção de boneca e artesanato	70
Figura 30: Mancha da distribuição da produção da mamona na Região Nordeste	71
Figura 31: Semente da mamona.....	72
Figura 32: Placa de espuma piramidal de poliuretano e suas dimensões	73
Figura 33: Desempenho das amostras (a); Tabela com relação da absorção pela frequência (b)..	73
Figura 34: Isocianato e Polioliol de mamona	74
Figura 35: Amostra de espuma de Polioliol de cana-de-açúcar	75
Figura 36: Pulverizador antimofa para superfícies	75
Figura 37: Ignífugo antichama proteção para espumas com laudo.....	76
Figura 38: Componentes Isocianato_A e polioliol de mamona_B (a); espuma de PUMA com mais isocianato e com maior rigidez (b); espuma com mais polioliol e menos isocianato (c)	81
Figura 39: Amostra (a) parcialmente murcha, amostra (b) maior rigidez e amostra com maior murchamento (c).....	82
Figura 40: Isocianato e polioliol de cana-de-açúcar (a). Espuma PUCA (b).....	83
Figura 41: Espuma vista em MEV com alcance de 30x, 100x, 200x e 500x respectivamente	84
Figura 42: Esquema da amostra	85
Figura 43: Três amostras de fibra de coco apresentando expansão das fibras por hidratação	86
Figura 44: Amostras com camadas de fibra de espessura de 10 mm e de espuma de 5 mm	86
Figura 45: Amostras 28 mm de diâmetro com dupla camada de fibra natural e espuma.....	87
Figura 46: A amostra de fibra de milho com presença de bolor em toda a sua superfície	87
Figura 47: Técnica de amostras conglomeradas com fibra e espuma.....	88
Figura 48: Amostras aglomeradas com fibra e espuma	88
Figura 49: Análise das amostras de fibra de coco (a), sisal (b) e cana-de-açúcar (c) vistas em MEV	90
Figura 50: Espuma de PUMA (a), PUCA (b) e conglomerada de fibra e PUCA (c)	91
Figura 51: Esquema da bancada do método de Ingard/ Dear em (a) e Bies/ Hansen em (b)	96
Figura 52: Croqui da bancada de Resistividade ao fluxo.....	97
Figura 53: Analisador e gerador de sinais da marca Brüel & Kjær Type 3160-A-042	98

Figura 54: Em (a), os microfones da Brüel & Kjær Type 4937, 4938, 4939 pré-polarizados; em (b), dois microfones posicionados na luva do tubo de resistividade ao fluxo	98
Figura 55: Porta amostra e suporte para os microfones	99
Figura 56: Terminação Rígida com entrada para 1 microfone de ½"	99
Figura 57: Bancada de resistividade ao fluxo com método de Ingard e Dier	100
Figura 58: Em (a), o termo-higrômetro e em (b) as amostras.....	100
Figura 59: Esquema da onda estacionária dentro do tubo de resistividade ao fluxo	102
Figura 60: Ilustração do modelo do tubo de impedância usado nas medições como método da função de transferência	103
Figura 61: Linhas nodais em duto circular.....	104
Figura 62: Em (a), o mic. de ½"; Em (b), mic. de ¼"; Em (c) o analisador e o gerador de sinais..	105
Figura 63: Esquema do tubo de impedância, diâmetro 100 mm, e distâncias dos microfones em milímetros	107
Figura 64: Esquema do tubo de impedância, diâmetro 28 mm, e distâncias dos microfones em milímetros	107
Figura 65: Caixas dos alfinetes utilizados para controle da vibração e da ressonância.....	110
Figura 66: Amostras com 40 alfinetes cada unidade	110
Figura 67: Imagem (a) com alfinetes e imagem (b) sem alfinetes e com plasticina na borda	111
Figura 68: Amostras de Ø 28 mm com uma camada de fibra natural e outra de espuma.....	111
Figura 69: Bancada de medição em tubo de impedância para frequência de 400 a 6400 Hz	112
Figura 70: Esquema dos tubos de impedância de baixa (a) e alta (b) frequência.....	112
Figura 71: Esquema do método fio quente em (a), em (b) a maquete da bancada	115
Figura 72: Peneiras de dimensões distintas das malhas.....	116
Figura 73: Esquema do ciclo de vida de energético de uma construção	119
Figura 74: Em (a), o fruto do coco; em (b), a fibra da casca do coco	120
Figura 75: Em (a), a planta suculenta Agave Sisalana. Em (b), a fibra do sisal extraída por maquinário.....	121
Figura 76: Em (a), a cana-de-açúcar; em (b), o esquema da retirada dos seus insumos	123
Figura 77: Teste com a espuma PUCA (isocianato e polioli)	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Testes normatizados para qualificar as fibras naturais.....	20
Tabela 2: Componentes do poliol extraído da mamona.....	24
Tabela 3: Tempo de decomposição de alguns materiais.....	59
Tabela 4: Quantidade média de nutrientes encontrados na palha de milho.....	69
Tabela 5: Espuma de mamona caracterizada pela sua rigidez provocada por oléico.....	80
Tabela 6: Tabela de recomendações do fabricante SistLiq Inj.....	84
Tabela 7: Quantidades de amostras produzidas para os experimentos.....	89
Tabela 8: Espessuras e densidades das amostras fabricadas com Ø100 mm.....	89
Tabela 9: Composição dos materiais das amostras de fibra natural e espessura 10mm.....	90
Tabela 10: Espessura e densidade das amostras de PUMA e PUCA.....	91
Tabela 11: Especificações dos componentes.....	97
Tabela 12: Frequências mínima, máxima e frequência de corte no tubo de resistividade ao fluxo.....	103
Tabela 13: Frequências máxima, mínima e de corte dos tubos de medições.....	113
Tabela 14: Propriedade das amostras.....	128
Tabela 15: Método de Bies e Hansen para cada amostra fibra/PUCA.....	129
Tabela 16: Medição de resistividade ao fluxo das amostras de PUCC.....	129
Tabela 17: Medição de resistividade ao fluxo das amostras de PUSS.....	131
Tabela 18: Medição de resistividade ao fluxo das amostras de PUCN.....	132
Tabela 19: Em (a) amostras sem alfinetes e em (b) amostras com alfinetes.....	133
Tabela 20: Resistividade ao fluxo com as características das amostras.....	145
Tabela 21: Inventário do uso de água por kg das fibras.....	152
Tabela 22: Inventário do consumo de energia embutida, desconsiderando a mão de obra.....	152
Tabela 23: Consumo de combustível da origem até o laboratório de mecanismos.....	153

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Amostras de PUMA com espessura de 10mm	82
Gráfico 2: Medição de resistividade ao fluxo das 10 amostras PUCC	130
Gráfico 3: Medição de resistividade ao fluxo das 10 amostras de PUSS	131
Gráfico 4: Medição de resistividade ao fluxo das 10 amostras de PUCN.....	132
Gráfico 5: Média das amostras PUCC sem plasticina (a) e com plasticina (b)	134
Gráfico 6: Média das amostras de PUSS sem plasticina (a) e com plasticina (b).....	135
Gráfico 7: Média das amostras de PUCN sem plasticina (a) e com plasticina (b)	136
Gráfico 8: Em (a) medição da PUCC com alfinetes. Em (b) medição sem alfinetes.....	137
Gráfico 9: Em (a), medição da PUSS com alfinetes. Em (b), medição sem alfinetes	138
Gráfico 10: Em (a) medição da PUCN com alfinetes. Em (b) medição sem alfinetes.....	138
Gráfico 11: Em (a), média das 10 amostras e em (b), medições das amostras 4 e 5.....	140
Gráfico 12: Em (a), Função resposta. Em (b), o ângulo fase. Amostras enumeradas na legenda	140
Gráfico 13: Em (a) média das 10 amostras. Em (b) medições amostra 2 e 9.....	141
Gráfico 14: Em (a), Função resposta. Em (b), o ângulo fase. Amostras enumeradas na legenda	142
Gráfico 15: Em (a) média das 10 amostras. Em (b) duas medições, amostra 5 e 9	143
Gráfico 16: Em (a), Função resposta. Em (b), o ângulo fase. Amostras enumeradas na legenda	143
Gráfico 17: Função resposta do tubo vazio e de uma amostra de PUCA de 20 mm	144
Gráfico 18: Parte real normatizada (Z_s) de todas as amostras com os dois métodos	148
Gráfico 19: Coeficiente de absorção nas equações de DB e AC com as três amostras de fibra/PUCA.....	149
Gráfico 20: Aproximação numérica linear das fibra seca (a) e para fibra úmida (b)	150
Gráfico 21: Média das amostras com 40 alfinetes cada uma	155
Gráfico 22: Avaliação das amostras sem alfinetes e sem plasticina nas bordas	156
Gráfico 23: Avaliação das amostras com plasticina nas bordas.....	157
Gráfico 24: Média das medições das amostras nas frequências de 200 – 6400 Hz.....	158
Gráfico 25: Amostras de espuma de PUCA mensurada nas frequências de 100-1600 Hz	159
Gráfico 26: Amostras de espuma de PUCA mensurada nas frequências de 400-6400 Hz	160
Gráfico 27: Comparação dos dados experimentais com alfinetes com as equações empíricas ...	162

Gráfico 28: Comparação dos dados experimentais sem alfinetes e sem plasticina com as equações empíricas	163
Gráfico 29: Comparação dos dados experimentais com plasticina e com as equações empíricas	164
Gráfico 30: Comparação dos dados experimentais e eq. empíricas nas frequências 400/6400 Hz	166
Gráfico 31: Interpolação dos resultados das amostras de PUCC nas frequências de 100/5000 Hz	167
Gráfico 32: Interpolação dos resultados das amostras de PUSS nas frequências de 100/5000 Hz	168
Gráfico 33: Interpolação dos resultados de cana/PUCA nas frequências de 100/5000 Hz.....	169
Gráfico 34: Interpolação dos resultados da espuma de PUCA nas frequências de 100/5000 Hz .	170
Gráfico 35: Amostras de PU/fibra de coco, linha pontilhada a média, freq. de 200-1600 Hz	188
Gráfico 36: Amostras de PU/fibra de sisal, linha pontilhada a média, freq. de 200-1600 Hz	188
Gráfico 37: Amostras de PU/fibra de cana-de-açúcar, linha pontilhada a média, freq. de 200-1600 Hz	189
Gráfico 38: Amostras de PU/ fibra de cana-de-açúcar, linha pontilhada a média, freq. de 200-6000 Hz	189
Gráfico 39: Amostras de PU/ fibra de coco, linha pontilhada a média, freq. de 400-6000 Hz	190
Gráfico 40: Amostras de PU/ fibra de sisal, linha pontilhada a média, freq. de 400-6000 Hz	190
Gráfico 41: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar sem alfinetes	191
Gráfico 42: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar com 20 alfinetes	191
Gráfico 43: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar com 40 alfinetes	192
Gráfico 44: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar com 60 alfinetes	192
Gráfico 45: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar com 98 alfinetes	193

SIMBOLOGIA

<i>PUMA</i>	poliuretano de poliol de mamona
<i>PUCA</i>	poliuretano de poliol de cana-de-açúcar
<i>PU</i>	poliuretano derivado do petróleo
<i>SS</i>	fibra de sisal
<i>CC</i>	fibra de coco
<i>CN</i>	fibra de cana-de-açúcar
<i>FI</i>	força líquida
ξ	deslocamento da partícula
x	nova direção
dx	espessura
p	pressão acústica instantânea
t	tempo
u	velocidade da partícula
a	aceleração da partícula
ρ	densidade
m	massa
V_o	volume inicial
V	volume final
C	propriedade condensação
A	amplitude complexa
ω	frequência angular
k	número de onda
c	velocidade do som
$\tilde{Z}$	impedância acústica específica
r	resistência acústica
ρ_0	densidade do ar
Z_{ar}	impedância característica no ar
S	área do duto
S	seção da área
Z	impedância acústica
f	frequência
f_n	frequência de ressonância
f_a	frequência de ressonância

Z_s	impedância acústica de superfície
X	resistência característica do material absorvente
Y	reatância característica do material absorvente
α	coeficiente de absorção acústica
W_a	energia acústica absorvida
W_i	energia acústica incidente
E	módulo de elasticidade do material
ϵ	deformação específica
ζ	tensão
Λ	comprimento viscoso
σ	resistividade ao fluxo
α_∞	tortuosidade
Ω	porosidade
Z_c	impedância Característica
K	modulo de <i>bulk</i>
Y	como calor específico
N_{pr}	número de <i>Prandtl</i>
η	viscosidade do ar
ω	frequência angular
k_c	número de onda característico
R_0	resistência ao fluxo específica
l	espessura do material
ΔP	variação de pressão do ar
u	velocidade do ar
V	energia cinemática da velocidade microscópica molecular
$\bar{V}$	energia cinética de ondas macroscópicas
V_a	volume de ar dentro dos poros de um material
V_t	volume total de um corpo amostral
$\bar{\rho}$	densidade média do volume de ar
k_c	número de onda complexo

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE GRÁFICOS.....	vii
SIMBOLOGIA	ix
SUMÁRIO	1
CAPÍTULO	5
INTRODUÇÃO	5
Objetivo Geral.....	7
Objetivos Específicos.....	7
Justificativa	8
Conteúdo da Tese	8
CAPÍTULO 2	10
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Metodologias de medições das propriedades acústicas	10
2.1.1 Resistividade ao fluxo	10
2.1.2 Porosidade	13
2.1.3 Tortuosidade.....	14
2.1.4 Impedância Acústica.....	15
2.1.5 Materiais em multicamadas e Placa perfurada.....	17
2.1.6 Teste de flamabilidade, umidade e fúngico	19
2.1.7 Fibras naturais e Poliuretano de poliál vegetal.....	21
2.1.8 Característica da espuma a base de poliál petroquímico	25
2.1.9 Controle de vibração em espuma	27
2.1.10 Estudo de materiais Fibrosos.....	28
2.1.11 Ciclo de vida energético do material	30

CAPÍTULO 3	31
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
3.1 Equação da onda unidimensional	31
3.1.2 Solução da equação da onda harmônica.....	34
3.1.3 Propagação da onda sonora dentro do tubo	36
3.1.4 Campo sonoro no interior do tubo.....	39
3.1.5 Velocidade da partícula em tubo fechado	41
3.1.6 Ressonância dentro do tubo	42
3.1.7 Ressonância e Antirressonância em amostras	44
3.1.8 Propriedades dos materiais absorventes	46
3.1.9 Modulo de elasticidade dos materiais	48
3.2 Coeficiente de absorção sonora (α)	49
3.2.1 Resistividade ao fluxo σ	51
3.2.2 Tortuosidade α_{∞}	52
3.2.3 Porosidade Ω	54
3.2.4 Impedância Z	57
CAPÍTULO 4	58
ORIGEM DOS MATERIAIS.....	58
4.1 Cana-de-açúcar	59
4.2 Coco	63
4.3 Sisal.....	66
4.4 Milho	68
4.5 Mamona.....	70
4.6 Espuma de poliuretano, polioli de mamona e polioli de cana-de-açúcar	72
4.7 Tratamento antimofo e antichama.....	75
CAPÍTULO 5	77
METODOLOGIA	77
5.1 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS	79
5.1.1 Espuma de poliuretano de Polioli de Mamona (PUMA)	79

5.1.2 Espuma de poliuretano de Polioli de Cana-de-açúcar (PUCA)	83
5.1.3 Amostras de Fibras Naturais e Espuma.....	85
5.2 MÉTODOS NUMÉRICOS	92
5.2.1 Equações empíricas de Delany e Basley (DB).....	92
5.2.2 Método empírico de Allard e Champoux (AC)	93
5.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS	95
5.3.1 Resistividade ao fluxo	95
5.3.2 Função de transferência H12	103
5.3.3 Medições nas faixas de frequências 100-1600 Hz	109
5.3.4 Medições nas faixas de frequências 400-6400 Hz	111
5.3.5 Método do fio quente	114
5.3.6 Método da granulometria por peneiramento	116
5.3.7 Análise do ciclo de vida energético das amostras	117
CAPÍTULO 6	126
RESULTADOS	126
6.1 RESISTIVIDADE AO FLUXO σ	128
6.1.1 Fibra de coco/PUCA - PUCC	129
6.1.2 Fibra de Sisal/PUCA - PUSS	130
6.1.3 Fibra de cana-de-açúcar/PUCA - PUCN	131
6.2 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA – Frequências de 100-1600 e 400-1600 Hz.....	133
6.2.1 Experimentos nas frequências 100-1600 Hz.....	133
6.2.2 Experimentos nas frequências de 400 – 6400 Hz	139
6.3 MÉTODOS EMPÍRICOS:.....	145
6.3.1 Método empírico de Delany e Bazley (DB).	145
6.3.2 Método empírico de Allard e Champoux (AC).	146
6.4 PROPRIEDADE TÉRMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR E O CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DAS FIBRAS.	150
6.4.1 Fibra de cana-de-açúcar – Propriedade térmica	150
6.4.2 Análise do Ciclo de Vida Energético das amostras - ACVEA	151

CAPÍTULO 7	154
COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	154
7.1 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	154
7.1.1 Faixas de frequências de 100 - 1600 Hz.....	154
7.1.2 Faixas de frequências de 200 - 6400 Hz.....	157
7.1.3 Medição somente da espuma PUCA	158
7.1 RESULTADOS DAS EQ. EMPÍRICAS (AC E DB) E MÉT. EXPERIMENTAL (EXP).	161
7.1.1 Faixa de frequência de 100 - 1600 Hz	161
7.1.2 Faixa de frequência de 200 - 6400 Hz	165
7.2 RESULTADOS INTERPOLADOS.....	166
7.2.1 Interpolação das amostras de fibra de PUCC	167
7.2.2 Interpolação das amostras de PUSS	168
7.2.3 Interpolação das amostras de PUCN.....	169
7.2.4 Interpolação das amostras de espuma espessura 15 mm	170
7.3 APLICAÇÃO DO MATERIAL	171
CAPÍTULO 8	172
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	172
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	175
WEB-PESQUISA	186
APÊNDICE A	188
Medição de todas as amostras com as suas respectivas médias.....	188
APÊNDICE B	191
Medição das amostras sem alfinetes e com 20,40,60 e 98 alfinetes.	191

CAPÍTULO

INTRODUÇÃO

Contexto

No século passado, o tratamento acústico era comumente realizado com materiais de origem mineral, sendo o processamento de fabricação feito em altas temperaturas, que variavam de 1200 à 1500°C (Biolã, 2017). Outro material muito usado, de origem petroquímica, é a espuma de poliuretano; sendo a sua fabricação simples com baixo custo de processamento, por ser um bicomponente facilmente processado. Entretanto, para obter a matéria prima básica é necessário que o petróleo passe por um processamento de refinamento em reatores, demandando muita energia incorporada (Porfírio, 2023). Esses materiais possuem características de alta eficiência, entretanto com tempo de decomposição não estimado.

Atualmente, o mercado de tratamento acústico cresceu com uma variedade extensa de materiais de tratamento e isolamento sonoro específicos para cada tipo de frequências sonoras, tais como a lã de rocha, lã de PET, lã de vidro, placas perfuradas, placas em camadas, placas emborradas etc. Essas peças de tratamento alcançam bons resultados no coeficiente de absorção sonora, tornando-se indispensáveis em diversos setores das indústrias e da construção civil, ocorrendo assim um aumento da busca de soluções acústicas. Proporcionalmente ao consumo desses materiais, pouco se pensou na destinação final quando se encontram desgastados. Ressaltando que, por longas décadas, principalmente as lãs de minerais, de vidro e as espumas de poliuretano (PU) contribuíram para poluição do meio ambiente, embora hoje há conscientização de que a reciclagem demanda consumo alto de energia embutida. Além disso, esses materiais possuem um tempo de vida indeterminado.

Na acústica, há numerosos estudos com propósito de alcançar um material de tratamento acústico menos agressivos ao meio ambiente, objetivando o desenvolvimento menos impactante à flora e à fauna e com qualidade similar aos sintéticos destinados atenuação do ruído. Essas pesquisas, que buscam materiais para substituir esses materiais

acústicos ditos como “não degradáveis” por materiais alternativos de origem natural, vêm sendo assíduas mundialmente, tendo em vista produtos ecologicamente sustentáveis e com o desempenho similar os sintéticos (Silva *et al.* 2019); (Glé, *et al.* 2010); (Contreras *et al.* 2020).

Uma solução para reutilização, do PU por exemplo, seria a reciclagem mecanizada ou química; entretanto, mesmo que o resultado dessa espuma tenha a mesma qualidade de uma nova, o processamento, desde o transporte até o procedimento químico ou mecânico, gera um alto custo e uso de energia embutida (BASF SA, 2020). Por outro lado, quando este material é descartado na natureza, o seu tempo de decomposição é indeterminado; além do mais, é proibida a incineração por gerar gases altamente tóxicos. Na construção civil, o reaproveitamento de Poliuretano PU se dá como agregado para mistura do concreto leve por ser um polímero termorrígido, sendo frequente na indústria; entretanto, no canteiro de obra, essa técnica não é trivial por demandar equipamentos específicos (BASF SA, 2020).

As fibras naturais, como as de coco, sisal e cana-de-açúcar, possuem uma destinação certa de reaproveitamento, contudo apresentam nas indústrias agrícolas altos excedentes que são geralmente tratados como refugo da agricultura. Esses materiais possuem propriedades que permitem uma reutilização consciente que podem degenerar com o tempo ao serem descartadas no meio ambiente. As vantagens dos materiais fibrosos naturais apresentam-se desde o processamento do produto que demanda pouca energia embutida até as suas propriedades de absorção sonora representadas com bons resultados. Além disso, possuem um ciclo de vida tangível em contato com a natureza devido as suas características naturais, além de as fibras serem abundantes no território nacional.

Objetivo Geral

Esta tese apresenta materiais destinados ao tratamento acústicos, com características naturais, como as fibras da casca do coco (FCC), fibras do bagaço da cana-de-açúcar (FCN) e fibras da palha do sisal (FSS) e, com elas, o Poliuretano de poliálcool da cana-de-açúcar (PUCA). Com esses materiais, o objetivo geral desta tese é determinar as propriedades acústicas e amigáveis ao meio ambiente das fibras juntamente com a PUCA.

Objetivos Específicos

- a) Determinar o coeficiente de absorção sonora das amostras de fibra do bagaço da cana-de-açúcar FCN, fibra da casca do coco FCC e fibra do sisal FSS, todas com uma camada fina de espuma de PUCA (isocianato e poliálcool de cana-de-açúcar);
- b) Estabelecer medições com métodos acústicos normatizados ASTM E 1050-10 (2012) para o coeficiente de absorção nas frequências de 100 Hz à 6000 Hz;
- c) Determinar medições com métodos experimentais de Ingard/Dear (1985) e Bies/Hansen (1988) de resistividade ao fluxo com pressão sonora;
- d) Para o controle de vibração nos interstícios das amostras de PUCA, a parte espumosa da amostra, utilização da técnica de Iwase *et al.* (1998) que especifica a utilização de alfinetes nas amostras porosas;
- e) Conscientizar sobre os impactos de materiais acústicos com altas consequências ambientais no descarte e na tentativa de reciclagem mecanizada;
- f) Estabelecer uma breve linha de estudo sobre o ciclo de vida energético do material usado;
- g) Comparar os resultados dos estudos.

Justificativa

Com as mudanças climáticas intensificadas e os alertas pelas conferências mundiais a fim de reduzir os efeitos antrópicos nocivos ao meio ambiente, as medidas de mitigação de materiais poluentes vêm exigindo das indústrias alternativas menos agressivas à natureza. Dentro desse contexto, a indústria de materiais acústicos vem a cada ano acrescentando no mercado materiais reciclados de origem não convencional, a acústica, como a lã de PET, piso amortecedor feito de pneu reciclado, dentre outros materiais.

Assim como a lã de PET, piso de pneus reciclado e outros materiais de origem não convencional, as fibras naturais têm um alto potencial de utilização no ramo sonoro por atender as prerrogativas técnicas de absorção acústica e mitigação dos impactos ambientais.

Na indústria automotiva e na construção civil, as fibras naturais já se encontram inseridas em projetos executivos, porém de maneira limitada. Para que isso aumente, é fundamental sensibilizar através de dados técnicos as vantagens que das fibras naturais na acústica, por seu baixo impacto e baixo custo de produção.

Conteúdo da Tese

Esta tese está dividida em 8 capítulos, estabelecidos nas seguintes sequências:

Cap. 1 Introdução: Apresenta a síntese desta tese;

Cap. 2 Revisão bibliográfica: é descrito um breve relato sobre alguns trabalhos encontrados na literatura relacionados a métodos experimentais, formulações empíricas e utilização de fibras naturais como materiais de absorção sonora;

Cap. 3 Fundamentação teórica: são apresentados alguns conceitos importantes sobre a acústica, como: Equação da onda unidimensional; Solução da equação da onda harmônica; Propagação da onda sonora dentro do tubo; Campo sonoro no interior do tubo; Velocidade da partícula em tubo fechado; Ressonância dentro do tubo; Ressonância e antirressonância em amostras; Propriedades dos materiais absorventes; Módulo de elasticidade dos materiais; Coeficiente de absorção sonora;

Cap. 4 Origem dos materiais: são apresentados: a origem dos materiais naturais utilizados na produção das amostras, estatísticas sobre o seu plantio, uso e produção de resíduos, materiais sem aproveitamento e indicação de tratamentos antimoho e antichama;

Cap. 5 Metodologia: são detalhadas as produções das amostras; os métodos numéricos e os métodos experimentais aplicados;

Cap. 6 Resultados: são apresentadas as avaliações das amostras com os métodos: da resistividade ao fluxo; função de transferência; métodos empíricos e propriedade térmica da cana-de-açúcar e o ciclo de vida energético das amostras de fibra;

Cap. 7 Comparação dos resultados: são apresentadas as comparações entre os resultados avaliados: Comparação entre os métodos experimentais; Comparação dos resultados das equações empíricas (AC e DB) e métodos experimentais; Análises dos resultados interpolados; Aplicação dos materiais.

Cap. 8 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros: são apresentadas as conclusões dos métodos e experimentos efetuados juntamente com as indicações dos trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Introdução

Foi efetuado um extenso estudo das publicações em caracterização acústica com materiais alternativos naturais para dar suporte à redação e à execução desta tese. Inicialmente foram investigadas técnicas de medições clássicas, empíricas e experimentais; em seguida, tipos de materiais amigáveis ao meio ambiente e seus impactos, e, com isso, a estruturação das técnicas aplicadas. Deste modo, a produção das amostras de fibras naturais e as amostras de PUCA aderiram a algumas metodologias de experimentação para alcançar bons resultados de absorção sonora.

Considerou-se como cenário de estudo: Metodologias de medição das propriedades acústicas; Resistividade ao fluxo; Porosidade; Tortuosidade; Impedância acústica; Materiais em multicamadas e placa perfurada; Teste de inflamabilidade, umidade e fúngico; Poliuretano de poliol vegetal; características da espuma a base de poliol petroquímico; Controle de vibração em espuma; Estudo do material fibroso; Ciclo de vida do material energético.

2.1 Metodologias de medições das propriedades acústicas

2.1.1 Resistividade ao fluxo

Brown e Bolt (1942) publicaram, em seu estudo, medições de resistividade ao fluxo em vinte e quatro amostras, nas quais os dois principais aspectos de medição foram permitir uma correlação entre a impedância acústica e a teoria de medição da absorção sonora. Foi demonstrado um método preciso e detalhado que permitiu, através de uma rotina de medição, o desenvolvimento de novas ou modificadas estruturas de materiais absorventes. Bies e Hansen (1980) utilizaram sete tipos de materiais fibrosos e porosos na avaliação

experimental da resistividade ao fluxo para identificar o controle da reverberação em campo sonoro de um invólucro, a redução da perda de transmissão através de um envoltório de tubos e paredes, e a atenuação ou controle de propagação sonora através de dutos. Com essas aplicações, puderam identificar a eficiência do material poroso e fibroso para o controle sonoro.

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

Fellah *et al.* (2007) usaram o método de transmissão acústica a partir de medições de permeabilidade em materiais porosos de paredes rígidas, sendo este parâmetro importante para caracterizar espumas plásticas, materiais fibrosos e granulares. O método tem um modelo de cinco problemas de espalhamento direto e inverso, sendo usado em placa porosa, isotrópica, homogênea e de estrutura rígida para a difusão de ondas transitórias de baixa frequência.

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

Rey, Del *et al.* (2013) propuseram uma metodologia para obter equações empíricas, descrevendo as características de absorção sonora de materiais absorventes em fibras de coco. O método requer medições em resistividade ao fluxo e impedância acústica. As equações são derivadas da impedância acústica e a constante de propagação. Os resultados podem ser úteis em modelos de simulações de sistema acústico para controle de ruído com fibra de coco. A medição com resistividade ao fluxo contribui para aumentar o grau de confiabilidade dos resultados de absorção sonora; para isso, existem formas de medições.

O trabalho de Glé *et al.* (2013) objetivou tratar da compressão fundamental entre forma da partícula, tamanho dos poros e as propriedades acústicas dos materiais porosos resultantes. Com isso, foi medido o coeficiente de absorção de 5 amostras de cânhamo através do tubo de impedância com três microfones; foram avaliados também a densidade

equivalente, o módulo de bulk, os efeitos térmicos, a forma da partícula, a distribuição dos poros, a porosidade, e a resistividade ao fluxo em tubo de impedância. O experimento de resistividade foi feito em tubo de impedância devido ao arranjo das partículas serem diferentes quando comparado com aqueles resultados obtidos no experimento de resistividade ao fluxo de ar. Este parâmetro aumenta devido a densidade e tamanho da partícula. Por fim, é demonstrado que o tamanho, a forma e as propriedades das partículas das amostras influenciam no comportamento acústico.

Sadouki, Kaid e Hasine (2020) propuseram um método de caracterização inversa para medir a resistividade ao fluxo em espuma plástica industrial de estrutura rígida em baixa frequência. Com isso, foram comparadas duas análises, uma considerando a porosidade e resistência e a segunda independente da frequência e dependente a resistividade ao fluxo. Os resultados dos métodos foram comparados com métodos clássicos analíticos. Foi percebido que o problema inverso é resolvido no domínio da frequência e os valores invertidos da resistividade são encontrados usando a expressões de baixa frequência do coeficiente de transmissão. Rodríguez *et al.* (2022) fizeram um trabalho com base no método de Ingard e Dear (1985) usando um procedimento eletroacústico e equações com método da matriz de transferência. Os resultados de resistividade ao fluxo de ar são estimados indiretamente a partir da impedância elétrica nos terminais de conexão de entrada do alto-falante. Diferentes amostras foram medidas com a abordagem do método de Ingard e Dear (1985) e o método padronizado pela ISO, demonstrando assim concordância dos resultados.

Ingard e Dear (1985) aplicaram um novo método de resistividade ao fluxo, sendo medido em tubo de impedância com dois microfones avaliando materiais porosos. Com isso, foram consideradas a resistência e a reatância através de dados experimentais. Bies e Hansen (1980) analisaram amostras de materiais fibrosos e porosos em resistividade ao fluxo, provando as aplicações dos resultados no controle da reverberação no campo sonoro em gabinete, a melhoria de perda de transmissão com revestimento em paredes e a atenuação de propagação em tubos. Conforme as medições, foi provado que os resultados de resistividade ao fluxo são suficientes para caracterizar o desempenho acústico para todas as aplicações consideradas comuns. Bies e Hansen (1988) publicaram, no livro *Engineering Noise Control*, um método de medição baseado nos estudos de Ingard e Dear (1985) de resistividade ao fluxo medido em tubo de impedância. O método consistiu no uso de três microfones com a proposta de obter a resistência ao fluxo normalizada com a pressão sonora.

2.1.2 Porosidade

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

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

Voronina, (1997) avaliou três tipos de materiais fibrosos e porosos de paredes rígidas através de experimentos e comparou com equações empíricas, utilizando a impedância característica e a propagação constante. O autor encontrou uma equação empírica das características estruturais das amostras em função da frequência, porosidade e diâmetro do poro. Os dois modelos foram comparados e mostraram resultados semelhantes para as características estruturais de materiais de fibrosos e porosos de paredes rígidas. Voronina, (1999) obteve dados experimentais de um material com baixa porosidade, por ser cerâmica porosa, através do melhoramento das formulações empíricas da impedância característica e propagação constante de Voronina (1997).

O novo modelo foi comparado com as teorias de Umnova *et al.* (2005), usando os dados experimentais obtidos por Champoux *et al.* (1991) das amostras de liga de cerâmica, gerando bons resultados. Leclaire Dupont *et al.* (2014) fizeram a medição de porosidade com duas câmaras, sendo uma ocupada por amostra e a outra somente com ar, chamada de câmara de referência. O método foi inspirado em Beranek (1942) com base na lei dos gases ideais. O experimento levou em consideração a redução da influência da temperatura no sistema, pois a mesma variação de temperatura é percebida nas duas câmaras.

Gros e Panneton (2004) utilizaram o princípio de Arquimedes na avaliação da porosidade, com uso de vácuo para medir massa porosa aparente de ar, a massa verdadeira em vácuo

e o volume de massa sólida. O método é simples e não demanda muito tempo e nem assume condições isotérmicas para o experimento.

Glé *et al.* (2010) avaliaram as propriedades acústicas de amostras de concreto misturados com fibra de Cannabis Sativa, comprovando alta porosidade. Os autores utilizaram os parâmetros de porosidade de Beranek (1942) e resistividade ao fluxo da norma ISO (ISO 9053, 2018) para caracterizar o corpo amostral. As análises demonstraram que a absorção sonora do material pode ser controlada por meio de componentes adequados ao processo; além disso, bons resultados foram apresentados por ambos os modelos.

2.1.3 Tortuosidade

Johnson *et al.* (1987) saturaram uma amostra porosa de parede rígida com um fluido newtoniano (gás Hélio), sujeitando-o a várias oscilações de pressão. Os autores apresentaram um novo parâmetro chamado de comprimento característico na avaliação da tortuosidade de materiais porosos rígidos e não rígidos. Mais tarde, Allard e Champoux (1992) aplicaram o conceito do comprimento característico introduzido na dinâmica da tortuosidade de (Johnson *et al.* 1987) para avaliar o módulo de bulk ou módulo volumétrico de materiais porosos.

Champoux *et al.* (1992) realizaram medições experimentais em amostras de espuma sintética com base na tortuosidade obtida através da condutibilidade elétrica em meio fluido através de uma amostra de material absorvente. O método se mostrou efetivo para amostras de alta resistividade ao fluxo e tortuosidade; entretanto, as amostras apresentaram desgastes aparentes após os ensaios.

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

Umnova *et al.* (2005) caracterizaram amostras grossas de poros rígidos através da porosidade e da tortuosidade. O método utilizado pelos autores usa um pulso de banda com frequência central perto de 12 kHz. A tortuosidade é deduzida através da obtenção da velocidade de propagação de fase entre os sinais incidente e refletido, sendo a porosidade obtida diretamente do coeficiente de reflexão sonora. O método apresenta bons resultados

até nos casos em que há espalhamento do pulso em frequências mais altas que o limite superior da largura de banda do pulso.

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

2.1.4 Impedância Acústica

Delany e Bazley (1970) obtiveram as propriedades acústicas de diversas amostras de fibras minerais porosas, fibrosas, isotrópicas e anisotrópicas com diferentes espessuras. Os autores determinaram o coeficiente de absorção como uma função da frequência de excitação através do uso da resistividade ao fluxo dos materiais. Nesse trabalho, foram publicadas duas expressões, uma para a impedância característica complexa e outra para número de onda propagação, expressões que, até o dia de hoje, são muito utilizadas. Ainda com Chung e Blaser (1980a) que desenvolveram o método de função de transferência para ser usado em medição de incidência normal de dutos para obtenção das propriedades acústicas de materiais absorventes. Nele, a decomposição da onda determina o coeficiente de reflexão complexo para ter a impedância acústica complexa, coeficiente de absorção de um material e a perda de transmissão sonora em dutos de materiais poroso. Chung e Blaser (1980b) validaram a teoria do método da função de transferência através de medições experimentais em espuma de polímero no interior de duto para obter o coeficiente de reflexão complexa e impedância acústica.

Miki (1990) modificou, em seu trabalho, as equações originais de Delany & Bazley (1970) para o estudo de materiais porosos de camadas duplas. Nesse trabalho, foram alterados os coeficientes das equações da impedância característica complexa e do número de onda. Allard e Champoux (1992) propuseram uma nova equação com o objetivo de solucionar a inconsistência das expressões de DB para baixa frequência.

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

Sebaa *et al.* (2005) propuseram uma medição de resistividade ao fluxo de espuma porosa de plástico industrial de parede rígida com base na relação entre a diferença de pressão e a velocidade de ar que atravessam uma amostra. A resistividade ao fluxo foi determinada a partir de problemas inversos e o método tem base em um modelo temporal de espalhamento direto e inverso para a difusão de ondas transientes de baixa frequência. Esse método apresenta vantagem de ser simples e efetivo.

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

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

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

Bansod e Mohanty (2016) aplicaram uma caracterização de inversão através do método de otimização do enxame de partículas, ou, do inglês, *Particle Swarm Optimization* (PSO),

estimando os parâmetros não acústicos da fibra de juta em forma de feltro e minimizando os erros entre dados experimentais e teóricos da absorção sonora. Os autores utilizaram o coeficiente de absorção através da matriz de transferência, juntamente com o PSO.

Hurrell *et al.* (2018) usaram amostras de fibra de poliéster para avaliação acústica em experimentos em tubo de impedância e modelos empíricos inversos de resistividade ao fluxo. O objetivo foi comparar vários modelos empíricos e encontrar resultados mais consistentes. Com isso, comparou os modelos empíricos de resistividade ao fluxo considerando amostras de materiais fibrosos. Dentre os modelos comparados, o trabalho de Miki (1990) é considerado o mais preciso quando se trata de método inverso em resistividade ao fluxo e impedância acústica da superfície.

Gómez Escobar *et al.* (2021) avaliaram amostras feitas a partir de bitucas de cigarro com espessuras de 12, 15, 20 e 26mm, em baixa e alta frequências. As amostras foram avaliadas em métodos da função de transferência e resistividade ao fluxo (Ingard e Dear, 1985), ambas em tubo de impedância acústica. Os resultados demonstraram que as amostras que foram limpas quimicamente corroboraram para melhores resultados, sendo de 0,35 a 0,42 de absorção nas faixas de frequências de 450Hz. Esse método é parecido com o de Ren e Jacobsen (1993), que mediram amostras fibrosas com a função de transferência e resistividade ao fluxo com reatância através do tubo de impedância, e os resultados foram comparados. Os resultados demonstraram que tanto a resistividade ao fluxo quanto a reatância podem ser obtidas em função da frequência. Além disso, as medições de resistividade ao fluxo em tubo de impedância demonstraram ser melhor considerar os valores globais que confiar em resultados de frequências discretas, pois, além das amostras serem feitas de forma cuidadosa, as medições devem ser feitas de maneira a evitar vazamento do som e movimentos oscilatórios para obter alta precisão.

2.1.5 Materiais em multicamadas e Placa perfurada

Tang e Yan (2017) examinaram a caracterização de amostras com multicamadas feitas a partir de tecido não tecido (TNT) e malha de PET direcionadas para absorção acústica. Com isso, foi verificado que cada material fibroso possui diferentes mecanismos de absorção e, quando juntos, melhoram a absorção acústica. Zulkifli, R. *et al.* e Nuawi *et al.*, (2009) fizeram um painel sanduíche com uma placa perfurada feita a partir de compostos de fibra/poliéster, sendo o painel preenchido com multicamadas de fibra de coco; com isso foi

avaliado o coeficiente de absorção sonora e a baixa transmissão. Para obter os resultados, foi usado método experimental, com sala reverberante, e uma simulação numérica, para comparar os resultados de coeficiente de absorção e perda de transmissão.

Çelebi e Küçük (2012) usaram fibra da folha do chá para misturar com base de poliuretano com a finalidade de produzir uma espuma macia e rígida para comparar a mais eficiente na absorção acústica. Os resultados demonstraram um aumento da absorção sonora em 50% da mistura de PU com a fibra da folha de chá (espuma macia) nas faixas da frequência média.

Rey *et al.* (2015) avaliaram barreiras acústicas feitas a partir de placas perfuradas preenchidas com materiais reciclados de tecidos, sendo medidas em uma câmara reverberante pequena fabricada conforme a Norma ISO 354 (2003). Os resultados foram bons de acordo com as normas internacionais, sendo comparados com os materiais existentes no mercado para absorção acústica.

As propriedades de compósitos de multicamadas dos estudos de Su *et al.* (2019) contribuíram para a absorção e isolamento acústico conforme as propriedades dos materiais usados, sendo lã de vidro com camadas de espuma de poliuretano. Os resultados foram avaliados através de simulação e análises numéricas. Com isso foi demonstrado que a absorção sonora aumenta com módulos de volume desse material nas frequências acima de 4000Hz com coeficiente de absorção de 0.52; entretanto, abaixo dessa frequência, diminui a absorção para esse material. Enquanto que Shen *et al.* (2020) desenvolveram amostras finas de multicamadas de metal poroso com espessura total de 5mm para absorção sonora usando o método de matriz de transferência de JCA, simulação de elementos finitos e medição em tubo de ondas estacionárias para as faixas de frequências de 100-6000Hz.

Bucciarelli *et al.* (2019) elaboraram um painel de multicamadas microperfurado para absorção sonora de baixa frequência de banda larga, usando um modelo de circuito equivalente para análises de parâmetros. O objetivo foi confrontar os resultados da absorção mecânica e os parâmetros geométricos de absorção resultantes de experimento em tubo de impedância com o método da função de transferências. As amostras têm alta absorção sonora nas faixas de frequência de 400 a 2000 Hz. A absorção sonora através de painéis em multicamada microperfurado e impresso em 3D, com material polimérico foi realizada por Liu *et al.* (2017); a fase experimental foi avaliada em tubo de impedância e comparada com métodos analíticos; além disso, para potencializar os resultados, as amostras microperfuradas no experimento, variaram com incremento de cavidades atrás da placa

micro perfurada. Os resultados podem variar conforme a quantidade de perfuração e de cavidades atrás da amostra.

Wang *et al.* (2014) usaram um método biônico de multicamadas para uma nova análise de absorção sonora. As amostras compostas de micro-silte, um material fibroso e poroso, são como membranas micro perfuradas com espaços atrás. O método da transferência em impedância e simulação em elementos finitos foi utilizado para calcular a performance acústica que teve como resposta uma absorção sonora de 0.85 nas faixas de frequências de 200 a 2000Hz.

Amostras de fibra da casca do coco com várias camadas de ar para absorção acústica e placas perfuradas foram usadas em Fouladi *et al.* (2010). Os autores usaram os métodos analíticos clássicos e função de transferência para comparar com os resultados experimentais das amostras em tubo de impedância. Os resultados demonstraram ser melhores para baixa frequência quando usadas amostras de coco com a placa perfurada, embora esses mesmos resultados reduzam para média frequência. Além disso, as placas perfuradas contribuem para diminuir a espessura das amostras.

O uso de amostras de cobre poroso por Bai *et al.* (2019) obteve o coeficiente de absorção sonora de cinco tipos de amostras de acordo com normas e experimentos, considerando a resistividade ao fluxo, a porosidade, o princípio da absorção sonora normal das amostras sem compressão, com compressão, microperfuradas e comprimida, com painel de aço perfurado e microperfurada. Os resultados demonstraram que a absorção sonora melhorou 59,69% com as amostras com maior espessura, com compressão e perfuração, sendo superior as amostras que não foram perfuradas.

2.1.6 Teste de flamabilidade, umidade e fúngico

A norma que orienta os testes e ensaios de flamabilidade usam frequentemente como parâmetro a ASTM D 635 (2003), que determina a taxa de queima da amostra. Além desta norma, a UL 94 (2001) examina a taxa de queima e permite a classificação do polímero em algumas categorias, em conformidade com a padronagem estabelecida por cada ensaio. Uma das mais importantes medidas de prevenção ao incêndio conforme a norma UL 94, quando aplicado o ensaio de flamabilidade, permite compreender a capacidade de auto extinção de um material. Além disso, a norma classifica os polímeros de acordo com os critérios de autoextinguíveis, que denota a existência de uma chama por determinado tempo,

se extinguindo após a fonte de ignição. Em casos em que a fonte de chama é acompanhada de forma controlada é possível obter informações sobre a velocidade de propagação da chama, tendência a espalhamento do fogo por gotejamento de fração de plástico em chama e a densidade da fumaça. A Tabela 1 mostra algumas normas para testes que podem ser realizados em fibras naturais.

Tabela 1: Testes normatizados para qualificar as fibras naturais.

Testes		Indicação	Norma
Flamabilidade	Mede a velocidade da combustão		ISO 834-1; NBR 9179; ASTM-E119-18
Fogging (Fog)	Mede a resistência à chama		DIN 75201
Fungamento	Alcança as substâncias e partículas contidas nos gases evaporados e condensados da amostra		ASTM D 5393-1
Vapor d'água	Reprodução da evaporação e condensação das substâncias contidas nos materiais		ASTM 3274-09

Fonte: A autora, 2024.

Existem vários produtos específicos no mercado (por exemplo: CKC, 2020; Silaex, (2019) que contribuem para o tratamento anti-chama e impermeabilizante para as fibras naturais. Esses produtos tendem a otimizar a durabilidade das fibras por não permitirem, principalmente, que a umidade se propague nas fibras, evitando fungos e demais vetores.

Marques *et al.* (2018) estudaram os efeitos do tereftalato de polietileno e trihidrato de alumina na produção de resíduos de PET (material termo-acústico), objetivando a resistência ao fogo sem comprometer na qualidade do material. O compósito demonstrou alta estabilidade térmica através de análises termogravimétrica e baixa inflamabilidade através de análises de UL 94 e cone de calorimétrico. Entretanto, a microscopia do material demonstrou a redução dos poros da composição matriz do PU, não comprometendo o isolamento acústico e térmico, sendo um material que pode ser indicado para construção civil.

A realização de vários testes de Fatima e Mohanty (2011) sobre as propriedades acústicas e de inflamabilidade de materiais biodegradáveis de fibra natural e feltro de juta em amostras foram feitas de compósitos destinados as reduções de ruído em eletrodomésticos, automóveis e aplicações na arquitetura, medindo as propriedades acústicas, testes de retardamento de chama, limite de oxigênio, inflamabilidade e teste de densidade de fumaça. Os resultados demonstraram que a juta com baixa densidade é melhor

para absorção sonora e os compósitos de cola e juta têm alta transmissão sonora em relação ao tecido de juta. Os testes de inflamabilidade mostraram alto índice de limite de oxigênio nos compósitos comparados com as fibras naturais e os popularmente vendidos, com baixa densidade de fumaça e com capacidade de auto extinção de incêndio.

2.1.7 Fibras naturais e Poliuretano de poliál vegetal

Iannace *et al.* (2020) caracterizaram a fibra da raiz da *Palmyra* marrom (vassoura de bruxa) com métodos acústicos e um modelo numérico próprio; também foram feitas análises experimentais como: a resistividade ao fluxo, a porosidade e, com isso, a medição da absorção acústica. O coeficiente de absorção foi calculado com o modelo numérico usando algoritmos com base em rede neural artificial, comparando os resultados com regressão linear, com indicações de que o modelo de rede neural artificial apresentou bons resultados. Já Or *et al.* (2017) fizeram amostras com diferentes densidades de fibra de palma sem o fruto como alternativa de material de absorção acústica natural; entretanto foi observado que, quanto maior a espessura e a densidade, melhor a absorção sonora. Os experimentos foram feitos em tubo de impedância, resultando em um alto coeficiente de absorção sonora nas frequências de 1kHz e desempenho de bons resultados quando confrontados com os materiais sintéticos.

Amostras feitas da fibra de sisal Gomez *et al.* (2020) proveniente da Colômbia foram usadas como alternativa de material natural termoacústico, levando em conta a morfologia da fibra, com e sem TNT, aplicando os métodos de resistividade ao fluxo, rigidez dinâmica e condutividade térmica. Os resultados demonstraram que as amostras devem ser mais espessas e as fibras mais finas para alcançar bons resultados; além disso, ao confrontar os dados, as amostras mostraram efeitos de absorção sonora semelhantes ao material sintético nas faixas de frequência de 1kHz.

Huang *et al.* (2018) produziram espuma vegetal de bio-poliál a partir do nano-cristal extraído da palha de Colza e da celulose; a espuma foi preparada pela liquefação da palha em micro-ondas. Os resultados comprovaram que a espuma apresentou um melhor comportamento físico-mecânico em densidade e reticulação em comparação com as espumas a base de petróleo. Além disso, quanto maior a porcentagem de bio-poliál, melhor o desempenho da espuma.

Zhou *et al.* (2016) avaliaram a nanofibra da cenoura para melhorar o desempenho do polioli do poliuretano da mamona para formação de uma bio-espuma de nano-compósito. Com isso, caracterizaram as amostras feitas e observaram que as amostras teriam mais resistência a compressão, com células rígidas e poros fechados. Enquanto que Ji *et al.* (2020) caracterizaram amostras feitas de espuma de óleo vegetal, bio-poliuretano, e calcularam as diferentes microestruturas nos métodos teóricos de absorção acústica de Johnson-Champoux-Allard (1981), com análise de elementos finitos nas unidades de células periódicas em condições ideais. Os resultados demonstraram que o maior número de poros influencia na melhor absorção.

Chen e Jiang (2016) avaliaram as propriedades acústicas de um compósito de espuma feito a partir da matriz do poliuretano com fragmentos da folha do bambu, com medições do coeficiente de absorção e transmissão sonora em tubo de impedância, microscopia eletrônica e resistividade ao fluxo. Os resultados demonstraram que as partículas da folha de bambu contribuíram para o aumento da absorção e do isolamento acústico do PU em várias faixas de frequências.

Islam *et al.* (2018) fizeram amostras de espuma biodegradável a partir de micélio, avaliando o material com um modelo de multi-escala que aferiu o volume da rede de hifas, caracterizando o comportamento mecânico das amostras em função da densidade. Com isso, as características de microestrutura heterogênea, variedade espacial de densidade e comportamento mecânico não linear foram investigadas.

Vale *et al.* (2019) desenvolveram uma espuma de bio-poliols com alto desempenho obtido da liquefação de biomassa de produtos industrializados, cortiça em pó e casca de eucalipto. Os resultados demonstraram uma espuma rígida com alto rendimento e qualidade física, ao passo que as propriedades estruturais química, mecânica e as propriedades térmicas foram avaliadas através da espectroscopia de infravermelho transformada de Fourier, teste de compressão e análise termogravimétrica respectivamente.

Reciclar as partículas de lodo do resíduo da produção de papel para preencher a espuma rígida de poliuretano com o objetivo de melhorar suas características quanto a rigidez e emissão de gás foi realizado por Kairytė *et al.* (2018). Com isso, foram analisadas as propriedades físicas, mecânicas, estabilidade térmica e resistência ao fogo, o que resultou em uma baixa taxa de emissão de CO₂ e CO. A microscopia eletrônica mostrou que as partículas de lodo contribuíram para uma produção de espuma rígida de poliuretano mais limpa para meio ambiente.

Gama *et al.* (2019) fizeram uma espuma 3D com pó de cortiça e pó de poliuretano plástico melhorando as propriedades mecânicas da espuma e as aplicações térmicas. Os resultados da mistura demonstraram que a cortiça diminuiu a densidade, condutividade térmica e a rigidez do compósito; além de caracterizar boas propriedades de isolamento térmico e elástico, a espuma pode ser combinada com materiais de amortecimento, podendo melhorar as suas características.

Wu *et al.* (2019) fizeram uma substância reativa a base de phenylphosphoryl glycol ether oligomer para melhorar o retardamento de chama nas espumas rígidas de poliuretano, e para reduzir a fumaça toxica gerada após a incineração. A substância aplicada no poliuretano melhorou o retardamento em 24,5% e a taxa de liberação de calor diminuiu, sendo promissora para melhor o isolamento térmico e para retardar a chama.

Gwon *et al.* (2015) estudaram os efeitos das estruturas dos poros do poliuretano flexível na absorção sonora para tratar o ruído dentro do veículo. Foram usados dois tipos de catalisador gelificante e água para melhorar a espuma, permitindo a produção do maior de número de poros pequenos e melhor absorção. Resultou em espuma de baixa densidade e alta eficiência na absorção de baixa frequência devido ao alto número de células dispersas na espuma.

Li *et al.* (2019) fizeram uma estrutura de espuma flexível, alterando o conteúdo químico SEBS-g-MAH do poliuretano em duas etapas. Com isso, foram avaliados, em cada etapa, os efeitos de microestrutura, compressão e desempenho térmico. Os resultados mostraram que o material com o produto afetou a microestrutura, o *stresse* compressivo, a resistência à ruptura e o desempenho térmico, embora a aplicação do SEBS poderá servir como uma referência de compósito de espuma para absorver energia.

Bai *et al.* (2018) caracterizaram espuma feita com geopoliméricas e óleo vegetal, usando solução de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como agente formador de poros e o óleo como agente estabilizador. As espumas fabricadas apresentaram baixa densidade bulk, baixa condutividade térmica, alta porosidade e uma resistência à compressão aceitável. O agente estabilizador teve influência significativa na estrutura porosa da espuma.

Mazzon *et al.* (2015) fabricaram uma espuma rígida misturando epóxi derivado de óleo vegetal com amina cicloalifática e agente formador de espuma menos agressivo para ser aplicado em automóveis. O resultado foi a produção mais rápida de espuma, sendo feita em alguns minutos em temperatura de 48 °C com densidade aparente de 0,17g cm³.

Contreras *et al.* (2020) fizeram uma ampla investigação físico-química sobre a espuma de poliuretano feita a partir do poliol do óleo da papoula (*Lesquerella fendleri*), em que foram feitas análises da densidade aparente, teste de compressão, dimensão dos poros e suas propriedades de LPUFs otimizados com MDI. Com isso, foi obtida uma espuma de estrutura macro-porosa, na mistura de células abertas e fechadas, sendo mais termo-resistente que os produtos precursores. Também Viscusi (Viscusi *et al.*, 2020) fizeram espuma reforçada com fibra tratada de cânhamo, usando fonte matriz natural de diatomita, caracterizando a força de compressão mecânica e a condutividade térmica. Como agente de formação de espuma, foram usados Si em pó e surfactante vegetal, gerando uma espuma de baixa densidade, aproximadamente 350 kg/m³, e baixa condutividade térmica 0,06 w/mK.

Segundo Elaine Pinto *et al.* (2009) o poliol tri-funcional, óleo de mamona, derivado de fontes naturais, proporciona propriedades que permitem a sua transformação e adaptação a diferentes produtos. As principais características deste poliol é a presença de Poliuretano: reage como resistente aos ataques aos solventes, produtos residuais e baixa absorção a água, sendo indicado para recobrimento de circuitos eletrônicos, telefônicos, área biomédica e construção civil. A Tabela 2 mostra os componentes do poliol de mamona.

Tabela 2: Componentes do poliol extraído da mamona.

Ácido ricinolêico (ácido 12-hidróxi olêico)	89,4%
Ácido dihidróxi-esteárico	0,70%
Ácido palmítico	1,00%
Ácido esteárico	1,00%
Ácido olêico	3,00%
Ácido linolêico	4,20%

Fonte: Adaptado de De Carlo, 2002.

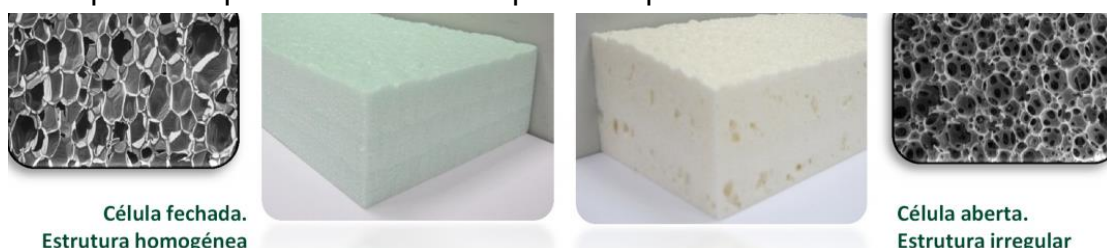
Conforme Ogunniyi (2006), 90% dos ácidos graxos presentes no óleo de mamona correspondem ao ácido ricinolêico, que é o ácido 12-hidroxiolêico, sendo que os 10% restantes são referentes a ácidos graxos não hidroxilados, principalmente os ácidos linoleico e oleico, o que confere ao óleo de mamona uma funcionalidade média de 2,7 e um índice de hidroxilas médio de 163 mg de KOH/g. Ou seja, trata-se de um produto com pureza, que permite reações que formam ligações entrecruzadas nas cadeias poliméricas.

2.1.8 Característica da espuma a base de polioli petroquímico

As principais espumas de Poliuretano existentes no mercado têm duas características, sendo as espumas de poros fechados e as de poros abertos, segundo PU Solution Elastogran Basf SA (2020). Essas duas espumas têm aparências semelhantes; entretanto, devem ser tratadas como dois produtos distintos, pois o tipo de célula irá influenciar diretamente nas propriedades fundamentais da espuma. As espumas de células fechadas (ECF) possuem uma certa regularidade nas proporções de poros, sendo quase simétricos, enquanto as de células abertas (ECA) apresentam um aspecto mais irregular dos poros, sendo distintos entre si.

Os produtos de ECF são melhores como isolantes térmicos, pois têm baixa condutividade térmica e impenetrabilidade da água (baixa absorção), possuindo uma alta capacidade de resiliência, alta resistência mecânica, com mais densidade que a ECA; entretanto, são melhor indicados para redução de baixa frequência. Os produtos ECA são mais eficientes na absorção sonora de alta frequência, possuem baixa resistência mecânica; para serem destinados a tratamento de baixa frequência com isolante térmico, é necessário que tenham grandes espessuras; quando colocados em parede sanduíche, necessitam de reboco hidrófugo, não sendo recomendados para ambientes expostos a condições climáticas.

Figura 1: Espuma de poros fechados e espuma de poros abertos



Fonte: Adaptado de PU Solution Elastogran (BASF- The Chemical Company), 2013.

Para Panneton *et al.* (2003), o estudo das características e efeitos das espumas, foi fundamental para compreender os mecanismos causados pela vibração através da onda sonora. Encontrando um método de excitabilidade nas amostras espumosas capaz de encontrar partes sólidas e fluidas, é possível saber a frequência de ressonância.

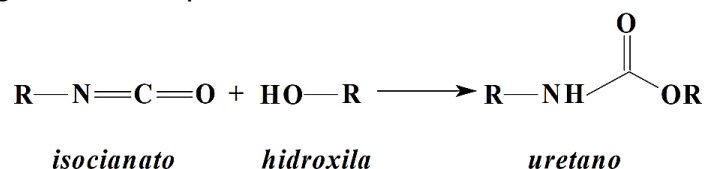
Veronese (2009) mostrou a correlação da espuma de PU, Poliuretano vegetal de óleo de mamona e de soja, demonstrando que a espuma a base de Polioli de mamona não

apresentou tempo de decomposição, devido as retículas dos polímeros que dificultaram a quebra das ligações químicas por enzimas, promovendo uma durabilidade alta.

Embora possua características similares à espuma sintética, o PU vegetal gerado possui, em sua grande maioria, células de poros fechados; por isso, ele se torna mais eficiente para o isolamento térmico, conforme Paula (2017) que caracterizou a espuma vegetal de poliol de mamona com reforço de serragem de pinus e fibra de sisal através de análise química, fazendo ensaio de flexão, tração perpendicular, absorção, inchamento em espessura, perfil de densidade raios-X e micrografias de MEV. Assim, foi comprovado que a expansão excessiva da espuma com compósitos promoveu a redução da massa específica, afetando todas as características físicas e mecânicas do compósito.

Segundo a norma ASTM D883-22 (2022), polímeros biodegradáveis são polímeros degradáveis com a ação de micro-organismos (bactérias, fungos e algas) juntamente com a exposição climática. Segundo Steinmtz (2012), o poliuretano é uma unidade monomérica principal de di-isocianato com poliol, sendo que a estrutura geral que constitui a base química do polímero é a ligação uretânica, tal como a cadeia química (Figura 2).

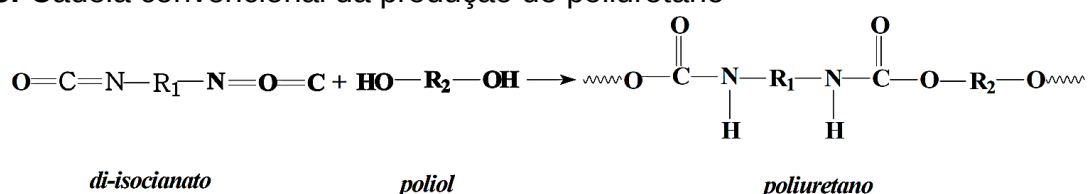
Figura 2: Estrutura global de um poliuretano



Fonte: Steinmetz Soares, 2012.

As principais reações de poliuretano-PU envolvem a reação entre isocianato e composto que possui hidrogênio ativo (poliol). O poliol é responsável pela formação de ésteres de ácido carbâmico, formando uma cadeia poliuretânica. Durante a reação dos dois compostos ocorre uma dispersão de gás que dá origem a pequenos bulbos ou células. A cadeia a seguir, (Figura 3), explana a síntese do poliuretano.

Figura 3: Cadeia convencional da produção de poliuretano

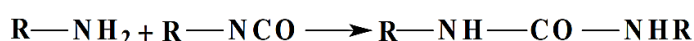
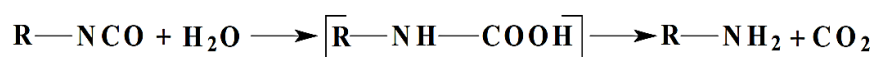


Fonte: Steinmetz Soares, 2012.

Para se produzir poros, paralelamente a reação de polimerização entre o isocianato e o polioliol, ocorre a reação entre o isocianato e a água, tendo como produto o ácido carbâmico, um composto de baixa estabilidade que se decompõe em amina e dióxido de carbono. Esse dióxido atua como agente de expansão durante a reação de polimerização, sendo responsável pelo crescimento da massa polimérica e a formação das células ou poros nas espumas de poliuretano.

Para produção de espuma rígida, a amina reage com outra molécula de isocianato para produzir uréia di-substituída, sendo responsável pela formação de segmentos rígidos de poliuréia por meio de ponte de hidrogênio e gás carbônico, (Figura 4):

Figura 4: Reação da expansão e formação de poliuréia



Fonte: Steinmetz Soares, 2012.

2.1.9 Controle de vibração em espuma

Materiais produzidos a partir de espuma possuem uma determinada densidade, e isso permite que os resultados saiam mais harmoniosos ou não nos resultados de absorção sonora. Iwase *et al.* (1980) iniciaram os estudos sobre a ressonância dentro do material poroso causado pela fonte sonora. Foram utilizados alfinetes em amostras porosas para conter a vibração nos poros, sendo medido em tubo de impedância.

Olny e Panneton (2008) mediram amostras de espuma, lã de vidro e lã de rocha, analisadas com métodos experimentais e empíricos clássicos. Para redução da vibração nas amostras, foi utilizada a técnica de Iwase *et al.* (1998) que consiste em utilizar alfinetes cravados nas amostras, pois, com a força de atrito entre os alfinetes e o esqueleto da amostra, o quadro de vibração é minimizado. Com isso, as amostras ficaram mais estabilizadas, reduzindo a vibração em seus poros, com melhores os resultados.

Panneton *et al.* (2003) elaboraram um estudo sobre a excitabilidade acústica da estrutura, denominada com a sigla FAE, de uma amostra porosa, em que foi medida a taxa de energia sonora na amostra; através disso, foi possível quantificar o grau de fase sólida e fluida do material poroso, ou seja, a sua rigidez. Assim, foi analisado que, quando maior o

F AE, mais unidas estarão a fase sólida e a fase fluida, ou seja, maior a compressão de onda na amostra. Ao comparar os valores da FAE com vários experimentos numéricos, foi possível entender que os desacoplamentos das fases demonstraram melhores resultados.

Liu (2016) fez a avaliação e a caracterização da frequência acústica dependente e os parâmetros de elasticidade em três amostras porosas com espessuras diferentes, aplicados os métodos de impedância característica, número complexo de onda e módulo longitudinal. Segundo o autor, os alfinetes colocados nas amostras para controlar a vibração na estrutura porosa podem alterar o comportamento acústico dos materiais, variando os efeitos conforme a frequência. Além disso, nas baixas frequências a impedância atingirá um estado de rigidez devido ao enrijecimento causado pela fricção dos alfinetes, e, ao aumentar o número de alfinetes, as flutuações mudarão para as altas frequências; assim, a amostra poderá ser considerada rígida em uma faixa de frequência mais ampla.

Panneton (2007) investigou os limites de densidade da estrutura de materiais porosos quanto a baixa e alta frequência, sendo comparados posteriormente com resultados de medições experimentais e métodos empíricos clássicos. Conforme o autor, os resultados das amostras porosas rígidas e macias, em frequência considerada baixa, são significativamente mais alterados. O estudo comprovou que amostras que possuem poros de estrutura macia possuem bons resultados em todas as frequências, se comparadas com as fibras de estrutura macia.

Dong *et al.* (2023), realizou um estudo com amostras mistas, sendo uma parte de algodão carbonizado e outra com uma estrutura em forma de favo de mel. Para potencializar a absorção sonora, a amostra foi perfurada com agulhas, tendo como gabarito uma placa perfurada. Os resultados demonstraram que o algodão carbonizado aumenta os efeitos do coeficiente de absorção sonora de 0.220 para 0.558; entretanto, quando perfuradas, a hierarquia dos poros ajuda um melhor alcance dos resultados, passando para 0.626 nas faixas de frequências de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000. As amostras foram medidas em Tubo de impedância, em baixa e alta frequências, em método da função de transferência e no modelo de elementos finitos.

2.1.10 Estudo de materiais Fibrosos

Allard & Champoux (1992) elaboraram uma nova expressão numérica a partir da equação de Delany e Bazley (1970), com a qual validaram a equação para baixas

frequências e a usaram em frequência dependente de forças viscosas em materiais porosos para prever o módulo de Bulk. Os autores sugeriram que a propagação sonora em materiais fibrosos é dependente do diâmetro da fibra e da densidade do material. Kirby e Cummings (1999) fizeram um trabalho com base em um método semi empírico em meio fibroso, no qual descreveram um modelo capaz de prever as propriedades de bulk da lã de basalto em baixa e alta frequências. As propriedades dos materiais foram obtidas através de experimentos e os dados expressos na forma de lei de potência em conjunto ao método de ajuste de curva de Delany & Bazley (1970).

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

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

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

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

2.1.11 Ciclo de vida energético do material

A análise do ciclo de vida energético - ACVE é um parâmetro que identifica o ciclo de vida e o consumo de energia gasto em todo processamento da geração de um material ou objeto. Um dos pioneiros nos estudos de análise do ciclo de vida de materiais, Bekker (1982) analisou os impactos de fontes naturais e não renováveis na construção civil, analisando o ciclo de vida dessas fontes e suas influências.

Options e Brown (1996) fizeram um diálogo das análises comparativas entre energia embutida e análise EMERGY, objetivando questões de utilidade, abrangência, auto consistência e consistência para analisar os mesmos sistemas.

Treloar (1997) e Fay *et al.* (2000) fizeram análises teóricas sobre o ciclo de vida energético usando um caso australiano para demonstrar estratégias de eficiência energética em projeto residencial. Treloar *et al.* (2002) apresentaram um novo método de energia embutida através de um modelo híbrido em edifícios com a finalidade de proporcionar dados mais confiáveis para esse tipo de análise.

Tavares (2006) fez um amplo estudo sobre o ciclo de vida energético das edificações brasileiras identificando todos os eventos, e todas as suas fontes, que influenciam o consumo de energia ao longo da vida útil das edificações brasileiras.

Carvalho *et al.* (2016), aplicaram o ciclo de vida energético em fibras naturais (rami e juta) agregada a compósito, devido ao seu potencial de substituição em relação aos compósitos fibrosos poliméricos convencionais. Com isso, foi averiguado que o material natural é econômico quanto ao uso técnico e ambiental, com ciclo de vida é tangível.

Lu e Wang (2019) fizeram uma estimativa das emissões de carbono do ciclo de vida de um edifício hospitalar na China, através de simulação em Modelagem da Informação da Construção (BIM). A norma ASTM D 883 (ASTM, 2020) afirma que polímeros biodegradáveis são degradáveis com a ação de micro-organismos (bactérias, fungos e algas) juntamente com a exposição ao meio externo. Estudos relacionados a materiais biodegradáveis vêm sendo amplamente investigados com intuito de qualificar um material ecologicamente correto.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Introdução

As condições de propagação de ondas planas no interior de um tubo de impedância são de extrema importância durante os ensaios experimentais. Para isso, neste capítulo, são apresentadas as equações da onda sonora unidimensional, assim como a condição para a propagação da onda plana em dutos circulares como ocorre no tubo de impedância. Além disso, são apresentadas as equações de resistividade ao fluxo com métodos normalizados e clássicos.

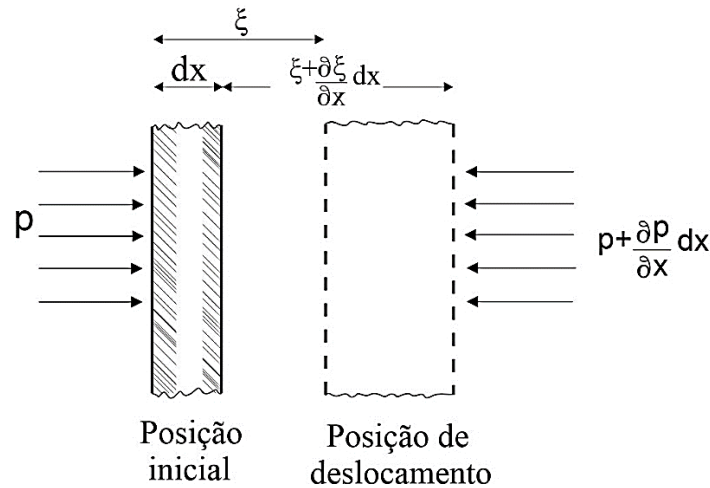
3.1 Equação da onda unidimensional

A onda unidimensional se caracteriza por ser uma onda plana, sendo a onda mais simples, que se propaga através de meios fluidos. Uma das propriedades mais importantes da onda é a pressão acústica e o deslocamento da partícula, tendo as mesmas amplitudes em todos os pontos de qualquer plano perpendicular à direção de propagação. A equação da onda, fisicamente escrita, é fundamental para descrever vários princípios para o controle do ruído. Entretanto, esta equação tem duas restrições. A primeira restrição pertence aos efeitos negligenciados de energia dissipativa e a segunda restrição é a pressão da amplitude da onda, que deve ser menor que a pressão atmosférica, segundo Barron (2003). Quando atendidas essas restrições por técnicas físicas, o resultado da análise é amplamente útil para soluções do domínio do ruído. A primeira restrição (Barron, 2003) é dada considerando o desprezo das forças de fricção, e a única força que atua no fluido é dada como pressão; logo, as forças líquidas Fl , resultantes em um elemento, são dadas:

$$Fl = pS - (p + \frac{\partial p}{\partial x} dx) S = - \frac{\partial p}{\partial x} dx S \quad (1)$$

Ainda conforme Barron, o som gerado por uma onda plana é transmitido na direção x com uma camada de fluido de espessura de dx e uma área de superfície de S . A velocidade da partícula que passa por um dado material em camada é modificada conforme o seu deslocamento por unidade de tempo, vide Figura 5.

Figura 5: Posição inicial e deslocamento de um fluido passante como onda sonora através de um elemento



Fonte: Adaptada, Randall F. Barron, 2003.

Em que ξ é o deslocamento da partícula instantânea, x a nova direção, dx é a espessura, p é a pressão acústica instantânea. A velocidade da partícula u , que passa por um material em camada, é calculada como a razão do deslocamento da partícula ξ com o tempo t , dada por $u = \frac{\partial \xi}{\partial t}$, e a aceleração da partícula a é calculada por $a = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$. A densidade ρ é dada pela razão da massa pelo volume $\rho = m/v$ e a massa específica por unidade de volume de uma pequena camada é dada como $dm = \rho S dx$. Para uma substituição na segunda lei de Newton, $F = m.a$, que resultará na equação da onda em sua forma diferenciada, vide eq. (2).

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

A forma final da equação da onda, eq. (2), pode ser escrita, em termos da pressão sonora, com diferentes variáveis. A velocidade do som em um fluido qualquer, tomado em uma constante de entropia, pode ser determinada na seguinte derivada $c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{\partial p}{\partial t} / \frac{\partial \rho}{\partial t}$ e $\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t}$. A propriedade condensação C pode ser definida como uma mudança fracionária

na densidade do fluido não perturbado ρ_o (usado na pressão atmosférica), com a densidade do fluido perturbado ρ , de forma que $\mathcal{C} = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} = \frac{\rho}{\rho_o} - 1$. Em termos de deslocamento da partícula e a variação do volume, a condensação pode ser reescrita, eq. (3):

$$\mathcal{C} = \frac{V_o - V}{V} = \frac{s - dxs \left(dx + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx \right)}{\left(dx + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx \right) s} = -\frac{\frac{\partial \xi}{\partial x}}{1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}} \quad (3)$$

Em que V_o é o volume inicial do elemento e V o volume final do elemento após a perturbação da onda. A segunda restrição Munjal (2013) e Barron (2003) é dada como o deslocamento muito pequeno da partícula no fluido, em que $\frac{\partial \xi}{\partial x} \ll 1$, e com isto, a condensação pode ser reescrita como a equação $\mathcal{C} = -\frac{\partial \xi}{\partial x}$. A densidade do fluido pode ser escrita em termos da condensação, unindo a equação $\mathcal{C} = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} = \frac{\rho}{\rho_o} - 1$ com a equação seguinte, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_o \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t}$. O resultado na equação $\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t}$ resultará na seguinte eq. (4). Levando a segunda derivada parcial de ambos os lados, resultará na eq. (5).

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_o c^2 \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \rho_o c^2 \frac{\partial^2 \mathcal{C}}{\partial t^2} \quad (5)$$

Induzindo a segunda derivada parcial da equação $\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$ e assumindo que o deslocamento é muito pequeno e a densidade praticamente constante em que $\rho = \rho_o(1 + \mathcal{C}) \approx \rho_o = \text{constante}$, resultará na eq. (6) e simplificando com a equação $\mathcal{C} = -\frac{\partial \xi}{\partial x}$, tem-se a eq. (7):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -\rho_o \frac{\partial^3 \xi}{\partial t^2 \partial x} = -\rho_o \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = +\rho_o \frac{\partial^2 \mathcal{C}}{\partial t^2} \quad (7)$$

Comparando as Eq. (5) e (7), a equação da onda é obtida em termos da pressão acústica instantânea; essa equação representa a equação da onda unidimensional.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (8)$$

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

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (9)$$

3.1.2 Solução da equação da onda harmônica

Uma maneira de solucionar a equação da onda, segundo Gerges (2000), é dada pela resolução geral da eq. (10):

$$P = F^1(ct - x) + F^2(ct + x) \quad (10)$$

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

$$P = Ae^{i(\omega t - kx)} + Be^{i(\omega t + kx)} \quad (11)$$

A velocidade da partícula u eq. (13) e (14), deslocamento da partícula ξ , eq. (15) e (16), e a condensação relativa das ondas $\mathcal{C}$ eq. (17) e (18) são dadas conforme o desmembramento da eq. (12), gerando P_+ e P_- , conforme as equações seguintes:

$$P_+ = Ae^{i(\omega t - kx)} \text{ e } P_- = Be^{i(\omega t + kx)} \quad (12)$$

$$u_+ = \frac{A}{\rho c} e^{i(\omega t - kx)} \quad (13)$$

$$u_- = -\frac{B}{\rho c} e^{i(\omega t + kx)} \quad (14)$$

$$\xi_+ = -\frac{iA}{\rho c^2 k} e^{i(\omega t - kx)} \quad (15)$$

$$\xi_- = -\frac{iB}{\rho c^2 k} e^{i(\omega t + kx)} \quad (16)$$

$$C_+ = \frac{A}{\rho c^2} e^{i(\omega t - kx)} \quad (17)$$

$$C_- = \frac{B}{\rho c^2} e^{i(\omega t + kx)} \quad (18)$$

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

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

$$P = A \cos(\omega t - kx) + B \cos(\omega t + kx) \quad (19)$$

$$\xi = \frac{A}{\rho c^2} \sin(\omega t - kx) - \frac{B}{\rho c^2} \sin(\omega t + kx) \quad (20)$$

$$C = \frac{A}{\rho c^2} \cos(\omega t - kx) + \frac{B}{\rho c^2} \cos(\omega t + kx) \quad (21)$$

$$u = \frac{A}{\rho c} \cos(\omega t - kx) - \frac{B}{\rho c} \cos(\omega t + kx) \quad (22)$$

A impedância acústica específica $\tilde{Z}$ da onda plana é definida como a razão entre a pressão acústica no meio e a velocidade da partícula. Esta impedância depende do meio e do tipo de onda (plana, cilíndrica etc.). No caso de ondas propagando-se no sentido positivo de x , é gerada a eq. (23):

$$\tilde{Z}_+ = \frac{P_+}{u_+} = \rho c \quad (23)$$

Para ondas planas que se propagam em direção negativa de x , é dado como a eq. (24), e seu valor real de magnitude ρc [Pa×s/m $\equiv$ Rayl]:

$$\tilde{Z}_- = -\rho c \quad (24)$$

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

$$Z = \frac{P}{u} = r + ix \quad (25)$$

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

$$Z_{ar} = \rho_0 c \text{ (Pa.s/m)} \quad (26)$$

$$(\rho_0 c)_{20} = 415,03 \quad (27)$$

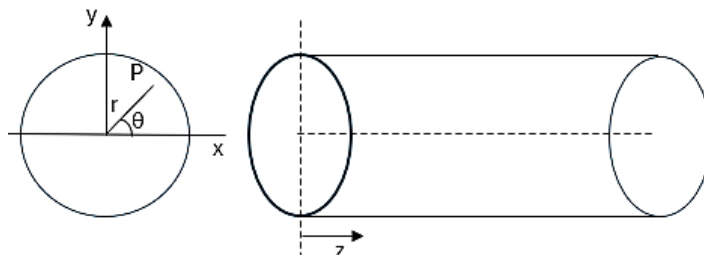
3.1.3 Propagação da onda sonora dentro do tubo

Considere um duto reto com paredes internas rígidas (sem revestimento com material de absorção). Caso o tubo seja excitado por uma fonte sonora, as ondas acústicas de propagação obedecem a equação da onda. Substituindo o operador Laplaciano de coordenadas cartesianas por coordenadas cilíndricas $\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$, (Figura 6), obtém-se a equação de propagação da onda em coordenadas cilíndricas Munjal (1987):

$$\frac{\partial p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (28)$$

A Figura 6 apresenta as coordenadas cilíndricas de duto com paredes rígidas.

Figura 6: Sistema de coordenadas cilíndricas em duto circular



Fonte: Adaptado Munjal (2014).

Considerando o operador Laplaciano ∇^2 em coordenadas cilíndricas sendo dado por:

$$\nabla^2 = \left[\frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] \quad (29)$$

A propagação da onda sonora em um tubo de seção transversal circular é governada pela eq. 28. Utilizando a técnica de separação de variáveis, e usando os termos $e^{i\omega t}$ e $e^{im\theta}$ e como dependente do tempo e do ângulo θ , respectivamente, tem-se $p(p, \theta, x, t) = \sum_m R_m(r) e^{im\theta} Z(x) e^{i\omega t}$. Assumindo a função $Z(x)$ como $Z(x) = C_1 e^{-ik_x x} + C_2 e^{ik_x x}$. Em que k_x é o número de onda que se propaga na direção axial x e derivando $Z(x)$ duas vezes em relação a x resulta na eq. (30):

$$\frac{d^2 Z}{dx^2} = -k_x^2 Z \quad (30)$$

Substituindo $p(p, \theta, x, t) = \sum_m R_m(r) e^{im\theta} Z(x) e^{i\omega t}$ na eq. (28) resultando na equação de Bessel para $R_m(r)$, conforme:

$$\frac{d^2 R_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_m}{dr} + \left[k^2 - k_x^2 - \frac{m^2}{r^2} \right] R_m = 0 \quad (31)$$

Conforme Munjal (1987), a solução geral da eq. (31) é dada:

$$R_m = C_3 J_m(k_r r) + C_4 N_m(k_r r) \quad (32)$$

O número complexo de onda que se propaga na direção radial é dado por $k_r^2 = k^2 - k_x^2$ e a função de Bessel de ordem m é dada por J_m e a função de Newmann de ordem m é dada por N_m . Quando $r=0$, $N_m(k_r r)$ tende ao infinito. Como a pressão acústica em qualquer ponto do plano transversal, a direção axial x deve ser finito, a constante C_4 deverá ser 0. Novamente, a velocidade radial na parede ($r=r_0$) deve ser 0, conforme a eq. (33):

$$\frac{dj_m(k_r r)}{dr} = 0 \quad (33)$$

Em que $r = r_0$. Com isso, k assume os valores discretos para satisfazer.

$$J'_m(k_r r_0) = 0 \quad (34)$$

Reescrevendo o valor de k correspondendo a n -ésima raiz conforme $k_{r,m,n}$, tem-se:

$$p(r, \theta, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} j_m(k_{r,m,n}r) e^{jm\theta} e^{j\omega t} (C_{1,m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} + C_{2,m,n} e^{jk_{z,m,n}z}) \quad (35)$$

Em que,

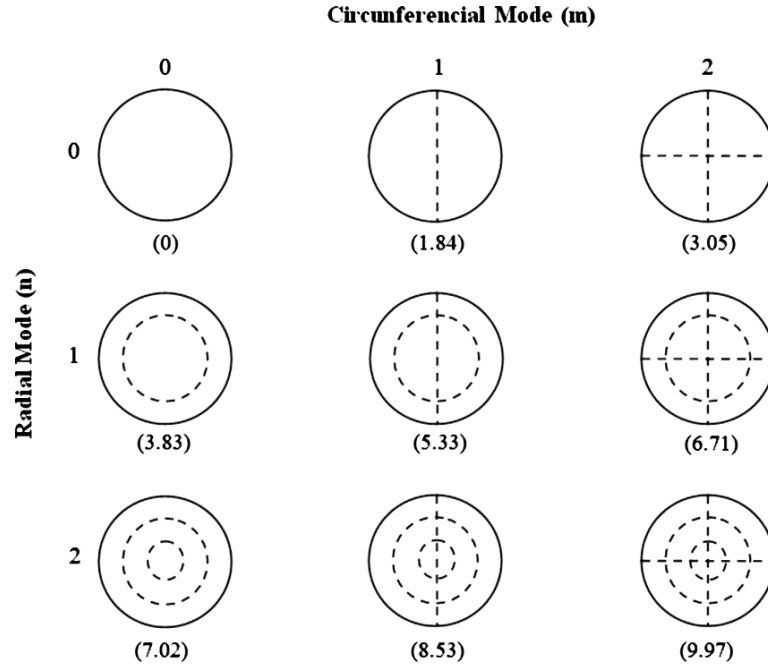
$$k_{z,m,n} = (k_0^2 - k_{r,m,n}^2)^{1/2} \quad (36)$$

o primeiro zero de j'_0 (ou j_1) é zero, $k_{r,0,1} = 0$ e $k_{z,0,1} = k_0$. Sendo assim, o modo (0,1) da Equação de $p(r, \theta, t)$ para a propagação da onda plana. Portanto, a onda plana correspondente ao modo (0,1) da equação $\frac{d^2 Z}{dz^2} = -k_z^2 Z$ e a atenuação de propagação. Para distribuição de pressão em dutos circulares, deve-se obedecer às seguintes considerações. Os dois primeiros modos de ordem superior (1,0) e (0,1) serão válidos se $k_{z,1,0}$ e $k_{z,0,1}$ forem reais, ou seja, se $k_0 > k_{r,1,0}$.

O primeiro zero de j ocorre em 1,84 e o segundo zero ocorre em 3,83. Assim, os números de onda de corte ficam, $1,84/r$ e $3,83/r_0$, respectivamente. Com isso, o primeiro modo azimutal ou diametral começa a se propagar em $k_0 r_0 = 1,84$ e o primeiro modo axissimétrico em $k_0 r_0 = 3,38$. Se a frequência for pequena o suficiente ou o comprimento de onda for grande o suficiente e considerando a propagação da onda no interior do tubo como $k_0 r_0 < 1,84$, a frequência de corte f_c será calculada com a eq. (37):

$$f_c < \frac{1,84c}{\pi D} \quad (37)$$

Considerando D ($2r$) o diâmetro do tubo. Nos dutos circulares, n representa o número de zeros da derivada $m' J$. A Figura 7 expõe a distribuição da pressão transversal em dutos circulares onde n corresponde o número de nós circulares. A propagação de ondas planas é representada pelo modo (0,0) e os índices m e n representam o número de nós da distribuição de pressão nas suas respectivas direções. A distribuição de linhas nodais de pressão transversal em tubo circular.

Figura 7: Propagação sonora em duto circular com as linhas nodais como $m=2$ e $n=2$ 

Fonte: Eriksson, 1980.

3.1.4 Campo sonoro no interior do tubo

Considere um tubo de seção constante fechado, sendo o campo sonoro excitado por um pistão em uma das extremidades, movimentando-se com velocidade $u(t)$ em $x=0$ ou seja:

$$u(t) = u_0 e^{i\omega t} \quad (38)$$

Para equação a onda unidimensional, a solução é dada por $p(x, t) = \tilde{A}e^{j(\omega t - kx)} + \tilde{B}e^{j(\omega t + kx)}$ sendo substituída pela equação da conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, \text{ tem-se:}$$

$$p_0 \frac{\partial u}{\partial t} = -Ak_0 i e^{i(\omega t - k_0 x)} + Bk_0 i e^{i(\omega t + k_0 x)} \quad (39)$$

Resolvendo a eq. (39) em relação ao tempo obtém-se a eq. (40) da velocidade da partícula u no interior do tubo fechado:

$$u(x, t) = \frac{1}{p_0 c_0} [Ae^{i(\omega t - k_0 x)} - Be^{i(\omega t + k_0 x)}] \quad (40)$$

Na terminação rígida, quando $x=L$, a velocidade da partícula u é nula. Para isso, substituindo esta condição na eq. (40), tem-se:

$$u(L, t) = \frac{1}{p_0 c_0} [A e^{i(\omega t - k_0 L)} - B e^{i(\omega t + k_0 L)}] = 0 \quad \text{ou} \quad A e^{-ik_0 L} - B e^{ik_0 L} = 0 \quad (41)$$

No pistão, em $x=0$, a velocidade da partícula é igual a $u_0 e^{i\omega t}$, portanto $u(x, t)$ torna-se:

$$u(0, t) = \frac{1}{p_0 c_0} [A e^{i\omega t} - B e^{i\omega t}] = u_0 e^{i\omega t} \quad \text{ou} \quad A - B = u_0 p_0 c_0 \quad (42)$$

Resolvendo o sistema de Equações de (40-42), tem-se:

$$A = \frac{u_0 p_0 c_0 e^{-ik_0 L}}{2i \operatorname{sen}(k_0 L)} \quad \text{e} \quad B = \frac{u_0 p_0 c_0 e^{ik_0 L}}{2i \operatorname{sen}(k_0 L)} \quad (43)$$

Substituindo as Equações (43), obtém-se $p(x, t)$ e $u(x, t)$:

$$p(x, t) = \frac{u_0 p_0 c_0}{2i \operatorname{sen}(k_0 L)} [e^{ik_0(L-x)} + e^{-ik_0(L-x)}] e^{i\omega t} \quad (44)$$

$$u(x, t) = \frac{-u_0}{2i \operatorname{sen}(k_0 L)} [e^{ik_0(L-x)} - e^{-ik_0(L-x)}] e^{i\omega t} \quad (45)$$

Em que as parcelas $e^{ik_0(L-x)}$ e $e^{-ik_0(L-x)}$ serão iguais a:

$$e^{ik_0(L-x)} = \cos(k_0(L-x)) + i \operatorname{sen}(k_0(L-x)) \quad (46)$$

$$e^{-ik_0(L-x)} = \cos(k_0(L-x)) - i \operatorname{sen}(k_0(L-x)) \quad (47)$$

Aplicando as identidades trigonométricas fornecida pelas Equações (46) e (47) é possível reescrever como:

$$p(x, t) = i p_0 c_0 u_0 \frac{\cos[k_0(L-x)]}{\operatorname{sen}(kL)} e^{i\omega t} \quad (48)$$

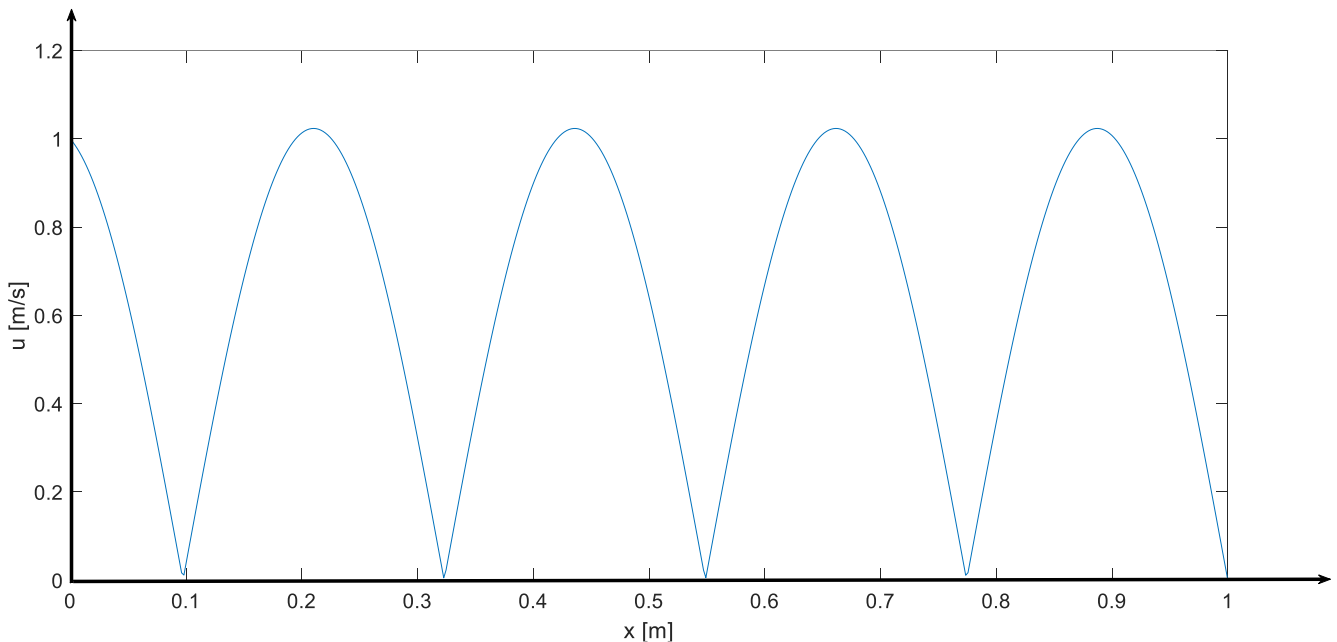
$$u(x, t) = u_0 \frac{\operatorname{sen}[k_0(L-x)]}{\operatorname{sen}(kL)} e^{-i\omega t} \quad (49)$$

Sendo assim, é possível observar que as equações (48) e (49) estão defasados a 90° .

3.1.5 Velocidade da partícula em tubo fechado

Considerando a velocidade da partícula u [m/s] em tubo fechado ao longo da posição x [m], e manifestando o comportamento oscilatório que sugere que o fluxo no tubo pode estar sujeito a um fenômeno periódico, apresentando uma onda estacionária ou com oscilação sob efeitos transientes. A velocidade u representa a velocidade da partícula no tubo, variando entre 0 -1 m/s e a posição ao longo do tubo x variando de 0-1 m. O formato da curva senoidal $u(x)$ discorre uma variação periódica da velocidade formando uma onda estacionária, conforme Gerges (2000); Munjal (2013), (Figura 8).

Figura 8: Velocidade da partícula em tubo fechado



Fonte: O autor, 2024.

Avaliando o tubo fechado em ambas as extremidades, deve-se considerar o nó de velocidade nas extremidades e ventres ao longo do tubo. Quando a amostra é colocada na terminação rígida do tubo, a onda incidente reflete, criando um nó de velocidade na interface. Assim, a pressão sonora na amostra é máxima, tornando a impedância acústica mais precisa, reduzindo a difração.

Para calcular as frequências dos modos de ressonância f_n no tubo com ambas as extremidades fechadas devem-se considerar $f_n = \frac{nc}{2L}$, sendo L o comprimento do tubo, c a velocidade do som e $n = 1, 2, 3, \dots$

Considerando a amostra muito próxima a superfície rígida e a velocidade da partícula é zero na terminação, o comportamento da onda refletida permite medir com maior precisão a

absorção sonora em tudo; embora a velocidade seja mínima na superfície da amostra, essa condição é desejável para os resultados das medições. Além disso, a intenção é usar este material na superfície o que representa as condições reais de absorção em superfície sólida.

3.1.6 Ressonância dentro do tubo

Giampaoli e Gerges (1989), consideraram um duto de área $S = \pi a^2$ e comprimento l , excitado por um pistão vibrante localizado no lado esquerdo, em que $x=0$, e S é a área da seção, considerando terminado no lado direito com impedância acústica Z em $x=l$. Aplicando

em $\underline{Z} = \frac{\underline{P}_l + \underline{P}_r}{\underline{U}_l + \underline{U}_r} = \frac{\rho c \underline{A} e^{-ikx} + \underline{B} e^{ikx}}{S_l \underline{A} e^{-ikx} - \underline{B} e^{ikx}}$ (a impedância acústica) em $x=l$, resulta em:

$$\underline{Z}_l = \frac{\rho c \underline{A} e^{-ikx} + \underline{B} e^{ikx}}{S_l \underline{A} e^{-ikx} - \underline{B} e^{ikx}} \quad (50)$$

A aplicação na equação da impedância $\underline{Z}$ em $x=0$, logo tem-se:

$$\underline{Z}_0 = \frac{\rho c}{S} \frac{\underline{A} + \underline{B}}{\underline{A} - \underline{B}} \quad (51)$$

Combinando as eq. (50) e (51) para eliminar as amplitudes complexas $\underline{A}$ e $\underline{B}$, tem-se:

$$\underline{Z}_0 = \left(\frac{\rho c}{S} \right) \frac{\underline{Z}_l + i \frac{\rho c}{S} \operatorname{tg}(kl)}{\frac{\rho c}{S} + i \underline{Z}_l \operatorname{tg}(kl)} \quad (52)$$

A eq. (52) mostra que a impedância de entrada depende: da impedância do terminal do tubo $\underline{Z}_l$; do comprimento do tubo l ; do número de onda k . A frequência de ressonância de um duto pode ser definida como sendo aquela onde o componente reativo da impedância de entrada é nula. Nessa frequência, a impedância de entrada é mínima e a potência irradiada para fora de um duto aberto é máxima. Sendo necessário substituir $\underline{Z}_l = (\alpha + i\beta)\rho c/S$:

$$\underline{Z}_0 = \left(\frac{\rho c}{S} \right) \frac{\alpha + i[\operatorname{tg}(kl) + \beta]}{[1 - \beta \operatorname{tg}(kl) + i\alpha \operatorname{tg}(kl)]} \quad (53)$$

A frequência de ressonância é obtida fazendo-se a componente reativa nula na equação anterior. Logo:

$$\beta tg^2(kl) + (\beta^2 + \alpha^2 - 1)tg(kl) - \beta = 0 \quad (54)$$

Em baixas frequências $\beta \ll 1$ e $\alpha \ll 1$, portanto, a eq. (54) simplifica-se para:

$$tg(kl) = -\beta \quad (55)$$

Quando o tubo termina em $x=l$ com um flange infinito, então $\beta \cong \frac{8ka}{3\pi}$, logo $tg(kl) = -\frac{8ka}{3\pi}$ e $tg(n\pi - kl) \cong tg\left(\frac{8ka}{3\pi}\right)$. Considerando n um número inteiro qualquer, ou:

$$n\pi - kl \cong \frac{8ka}{3\pi} \quad (56)$$

A frequência de ressonância fundamental corresponde a $n=1$, sendo dada por:

$$f_1 = \frac{c}{2(l+8a/3\pi)} \quad (57)$$

Com isso, o comprimento efetivo do tubo será igual a $(l+8a/3\pi)$. Com os dados de Giampaoli e Gerges (Gerges, 2000), em que a correção do tubo com flange, obtida por experimento resultando em $0,82a$, fornece um valor muito próximo de $8a/3\pi$. Assim:

$$f_1 = \frac{\rho c}{s} \frac{1}{itg(kl)} = -i \frac{\rho c}{s} \cot(kl) \quad (58)$$

Considerando $Z_0=0$ quando $\cot(kl)=0$, que corresponde a $kl = (2n-1)\pi/2$, então a frequência de ressonância, para o modo n é dada por:

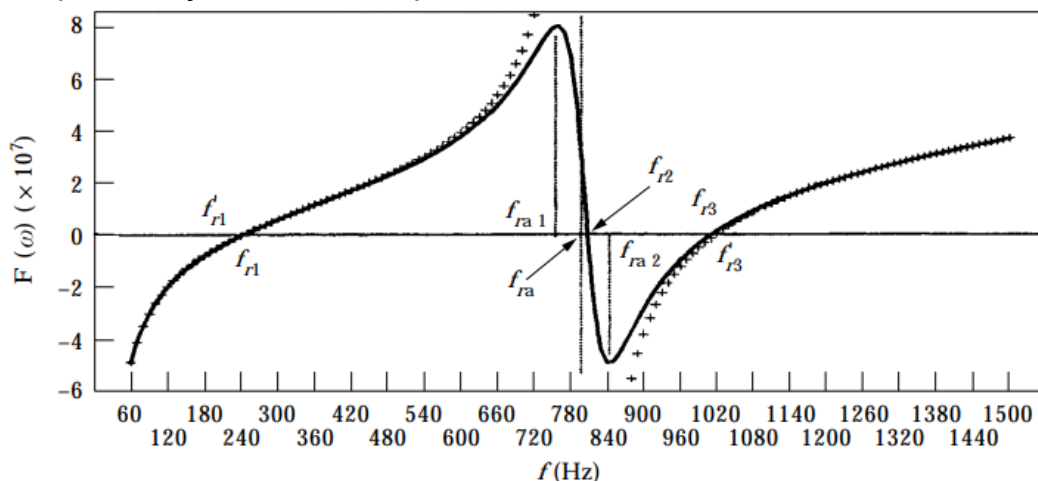
$$f_n = \frac{(2n-1)c}{4l} \quad (59)$$

Se $n=1$, se reduz a $f_1 = c/4l$, que está de acordo com a equação para a frequência fundamental de um tubo fechado, sendo comprimento igual a $1/4$ do comprimento de onda, logo a frequência de ressonância é equivalente aos harmônicos ímpares ($2n-1=1,3,5,7\dots$).

3.1.7 Ressonância e Antirressonância em amostras

É necessário analisar o tipo de amostra a ser medida para averiguar os fenômenos de ressonância e antirressonância. Zhang e Gu (1998) usaram equações analíticas para identificar as frequências de ressonância (f_r) e antirressonância (f_a), sendo dois parâmetros que dependem das características acústicas relativas. Em amostras com dupla camadas é mais frequente detectar a ressonância nos pontos de intersecção; além disso, em amostras de material espumoso, a ressonância tende a vibrar com os efeitos sonoros. Zhang *et al.* (1998) realizaram um experimento com amostras de duas camadas; sendo detectada a ressonância nos pontos de intersecção ilustradas no eixo horizontal e antirressonância nos extremos das curvas, conforme a Figura 9. As três frequências de Ressonância ($f_{r1} < f_{r2} < f_{r3}$) e duas frequências de antirressonância (f_{ra1} , f_{ra2}) nas amostras de dupla camadas, onde a resistência acústica é $R_{a2} \neq 0$.

Figura 9: Representação das três frequências de Ressonância e duas de antirressonância



Fonte: Adaptado Zhang *et al.*, 1998.

Em amostra de fibra de vidro com uma fina camada de tecido não tensionada, acarreta-se em antirressonância em frequências mais baixa, fazendo que haja limitação nas faixas de frequências em que a membrana pode ser útil para absorção, segundo Thomas e Hurst (1976). Além disso, para que haja absorção nas faixas de frequências acima de 6.000 Hz é necessário utilizar uma membrana mais rígida e tensionada.

Para amostras mais densas ou maciças, de borracha metálica por exemplo, a aquisição da frequência de ressonância e antirressonância pode ser calculada a partir de deduções das características de propagação não amortecidas de materiais porosos, conforme Wu *et al.*, (2009). Além disso, o coeficiente de absorção com a ressonância e antirressonância pode

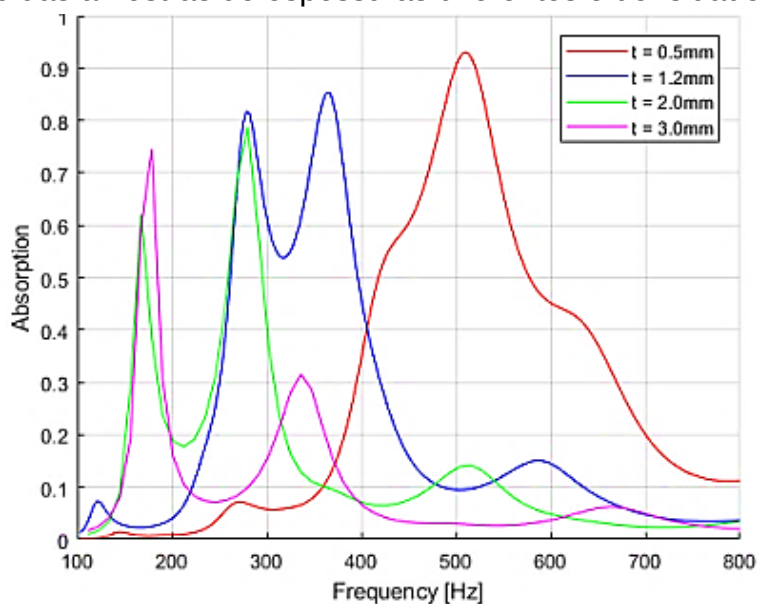
ser determinado de acordo com os parâmetros acústicos das amostras. Considerando a primeira ressonância eq. (60) a partir da impedância acústica de superfície ($Z_s = X + jY$) com coeficiente de absorção sonora de ressonância.

$$\alpha_{r,a} = \frac{4X\rho_0c_0}{(X+\rho_0c_0)^2+Y^2} \quad (60)$$

Em que α_r é o primeiro coeficiente de absorção com ressonância; α_a é o primeiro coeficiente de absorção com a antirressonância; X é a resistência característica do material absorvente; Y é a reatância característica do material absorvente e ρ_0c_0 é a impedância característica do ar. Wu *et al.*, (2009) comenta que materiais porosos são materiais ressonantes. Comprova que as medições em materiais espumosos tendem a ser menos lineares e a apresentar maior quantidades de picos.

Para explicar como o ganho de absorção sonora está relacionado com a ressonância, Bucciarelli e Meo (2020) fizeram um modelo numérico baseado na interação acústico-estrutural, utilizando amostras espumosas retangulares, sendo medidas em tubo de impedância. Os resultados demonstraram que quanto maior a espessura maior a eficiência nas frequências de 100-200 Hz, conforme a Figura 10, que considera t a espessura da amostra.

Figura 10: Medição das amostras de espessuras diferentes e densidade de 1200 kg/m³



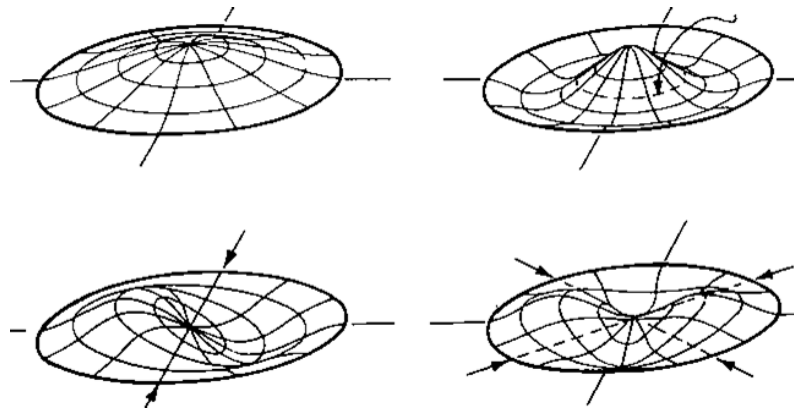
Fonte: Bucciarelli, 2020.

Nessas circunstâncias, para calcular a frequência de ressonância na unidade celular da amostra, considerando c a velocidade do som no ar, ρ é a densidade do ar, m a densidade por unidade de área da membrana e d a profundidade da cavidade.

$$fr = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{md}} \quad (61)$$

A Figura 11, retrata como as amostras circulares de bordas fixas se comportam com os modos de vibração, segundo Morse e Ingard (1987).

Figura 11: Modos de vibração em placas circulares



Fonte: Philip e Ingard, 1986.

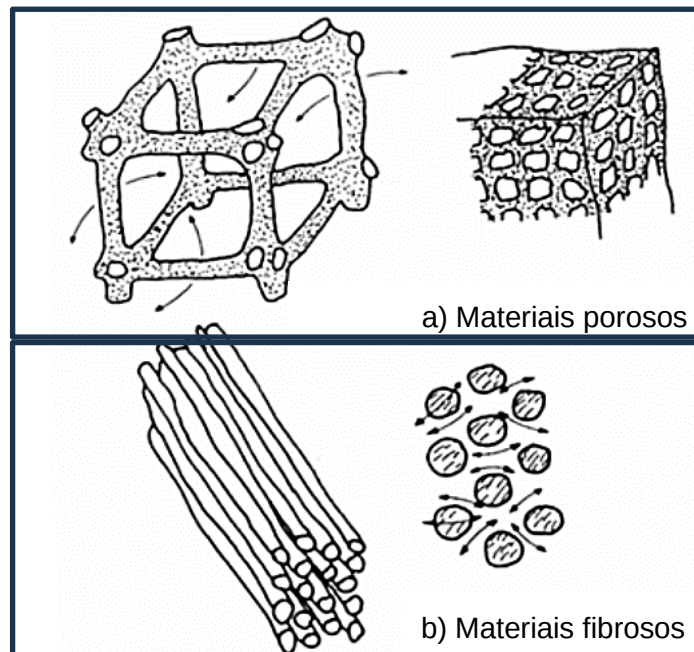
3.1.8 Propriedades dos materiais absorventes

Os materiais presentes no mercado que apresentam boa absorção acústica são normalmente porosos ou fibrosos. Gerges (2000) menciona que esses materiais apresentam características conforme as suas estruturas. Por exemplo, para materiais porosos, a energia acústica incidente nos poros dissipa-se por inúmeras reflexões e atrito viscoso, transformando assim em energia térmica. Entretanto, para materiais fibrosos, a energia acústica incidente entra pelos interstícios das fibras; isso faz que as fibras vibrem junto com ar, dissipando-se por transformação em energia térmica por atrito entre as fibras excitadas.

O caminho da dissipação de energia sempre ocorrerá nos espaços entre a estrutura do material; com isso, tanto o material poroso quanto o fibroso são essenciais para que haja passagem para um fluxo de ar. Isso terá como consequência a possibilidade da propagação

de ondas acústicas pelo ar dos poros e/ou interstícios do material; logo, para que um material seja considerado bom absorvente acústico, deve ter células abertas. A Figura 12 ilustra a dissipação da energia entre a estrutura de materiais porosos e fibrosos e os mecanismos de dissipação da energia sonora nos materiais.

Figura 12: Estruturas de materiais porosos (a) e fibrosos (b)



Fonte: Gerges, 2000.

A técnica mais simples de verificar a permeabilidade ao fluxo de ar de um material é assoprando-o contra a boca. Como exemplo, ao executar a ação de assoprar uma espuma, uma cortiça e um tijolo, a espuma apresentará maior permeabilidade à passagem do fluxo de ar do que os outros materiais mencionados.

Para se avaliar um material quanto a sua absorção, é necessário conhecer as suas características; para isso, a absorção acústica de um material é determinada por um coeficiente de absorção acústica α , tal como menciona no Cap. 2.1.8.

Assim, o coeficiente de absorção acústica α é definido pela razão entre a energia acústica absorvida W_a e a energia acústica incidente W_i , conforme a eq. (62).

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (62)$$

Evans *et al.* (1960) e Gerges (2000-pg 349), mencionam que o valor do coeficiente de absorção sonora α sempre deverá ser positivo; deve variar de zero a um ($0 \leq \alpha \leq 1$) e é dependente da frequência, ângulo de incidência do som, tipo de campo sonoro (difuso, ondas planas etc.), densidade, espessura do material, estrutura interna do material.

3.1.9 Módulo de elasticidade dos materiais

Muitos materiais são produzidos para sofrer deformações pequenas, considerando a deformação específica em cada material como uma característica importante, afirma Beer (2000). Assim, para calcular uma tensão-deformação pequena, considera-se ζ a tensão e sendo diretamente proporcional a deformação específica ϵ , e E é chamado de módulo de elasticidade do material tal como a equação: $\zeta = E\epsilon$.

Essa relação é conhecida como lei de Hooke (2004), em homenagem ao matemático inglês Robert Hooke (1635-1703), e o módulo de elasticidade do material envolvido, conhecido também como módulo de Young, em homenagem ao cientista inglês Thomas Young (1773-1829). Contudo, é necessário ponderar que a deformação específica, sendo ϵ , é uma unidade adimensional, e o módulo de elasticidade E expresso nas mesmas unidades da tensão ζ , em Pascal.

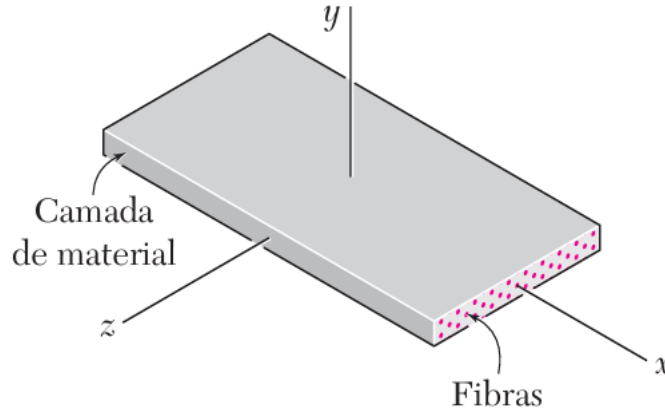
Materiais Isotrópicos

Materiais como os metais estruturais que possuem a mesma rigidez ou a capacidade de resistir a deformação dentro da região linear são considerados isotrópicos. Ou seja, eles possuem o seu módulo de elasticidade que é independente da direção considerada. Beer (2000) menciona que materiais com tensão normal e deformação específica normal são independentes da direção de carregamento; isso se deve a propriedades mecânicas de cada material e seu módulo de elasticidade E . Além disso, conforme Almeida (2012), um material é considerado isotrópico e as suas propriedades mecânicas e térmicas são as mesmas em todas as direções, mesmo tendo a estrutura microscópica homogênea ou não. O tensor de elasticidade é a principal propriedade desse tipo de material, que será o mesmo tensor sob qualquer rotação do sistema de eixos de coordenadas. Os materiais isotrópicos apresentam eixos principais de deformação coincidentes com os eixos principais de tensão.

Materiais Anisotrópicos

Beer (2000) analisa materiais que possuem propriedades que dependem da direção considerada e que são denominados de anisotrópicos, como por exemplo a classe de materiais compósitos reforçados com fibra. Tais materiais apresentam diferentes módulos elásticos em diferentes direções. Conforme o exemplo da Figura 13:

Figura 13: Exemplo de material compósito reforçado com fibras



Fonte: Adaptado Beer, 2000.

A Figura 13 configura um material com grande quantidade de fibra em sua composição, considerando uma força axial aplicada no eixo x , ou seja, paralelo as fibras, que irá provocar uma tensão σ_x na lamina e uma deformação específica normal em ϵ_x . É importante ressaltar que materiais menos resistentes, quando misturados com fibras, ficarão mais resistentes a deformação.

3.2 Coeficiente de absorção sonora (α)

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

Estes materiais permitem que haja uma passagem de fluxo de ar no seu interior, acarretando possíveis propagações de ondas acústicas pelo ar dos poros ou pelas fendas das fibras. Materiais que possuem alto coeficiente de absorção α são considerados bons absorvedores sonoros. O coeficiente de absorção é definido pela razão entre a energia acústica absorvida W_a e a energia acústica incidente W_i . Considerando a eq. (62), sendo $\alpha = \frac{W_a}{W_i}$.

O valor do coeficiente de absorção sempre será positivo, podendo variar de zero a um ($0 \leq \alpha \leq 1$) e depende: da frequência, ângulo de incidência do som, tipo do campo sonoro (difuso, ondas planas, etc.), densidade, espessura e estrutura interna do material, conforme Bistafa (2018); e Gerges (2000).

Para análise de materiais e ou para quantificar suas características internas, são usados vários parâmetros. Entretanto, nesta tese serão mencionados quatro parâmetros importantes: Resistividade ao fluxo σ , Tortuosidade α_∞ , Porosidade Ω e Impedância acústica Z . As equações empíricas de Delany e Bazley (1970) apresentam apenas dois tipos de experimentos para chegar à solução do coeficiente de absorção, sendo a resistividade ao fluxo e a impedância acústica. As principais faixas de frequência para esse modelo estão em $0.01 \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1.00$. Este modelo será melhor detalhado nos métodos experimentais, no Capítulo 5.3.

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

Nele, a densidade característica através de ρ_c é igual a eq. (63):

$$\rho_c = \rho_0 \alpha_\infty \left[1 + \frac{\sigma \Omega}{i \alpha_\infty \rho_0 \omega} \left(1 + \frac{4 i \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \Omega^2} \right)^{1/2} \right] \quad (63)$$

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

$$K = \frac{\gamma \rho_0}{\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 - \frac{\sigma \Omega}{i \alpha_\infty \rho_0 N_{pr} 2 \omega} \left(1 + \frac{4 i \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 N_{pr} \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \Omega^2} \right)^{1/2}}} \quad (64)$$

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

$$Z_c = \sqrt{K \rho_c} \quad \text{e} \quad k_c = \sqrt{i 2 \pi f (\rho_c K)} \quad (65)$$

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

$$Z_s = -j Z_c \cotg k_c l \quad (66)$$

As principais propriedades necessárias para obter o coeficiente de absorção dos materiais, são: Resistividade ao fluxo σ ; Tortuosidade α ; Porosidade Ω ; Impedância Z . Conforme é explanado nos tópicos seguintes.

3.2.1 Resistividade ao fluxo σ

Quando um determinado fluxo de ar passa por um material poroso ou fibroso, este material terá, como consequência, a possibilidade de propagar ondas sonoras através do ar que passa em seus poros e cavidades no interior. A resistividade ao fluxo σ é normatizada pela (ASTM-522, (2012) que orienta e padroniza a construção de uma bancada para experimentação e a preparação de amostras, o que será mencionado com detalhes no Capítulo 5. A resistência ao fluxo específica, que não depende da espessura para ser calculada, é representada por R_0 e calculada em *mks* (metro-kg (quilograma)-segundo) ou em Pa.s/m, sendo expressa por:

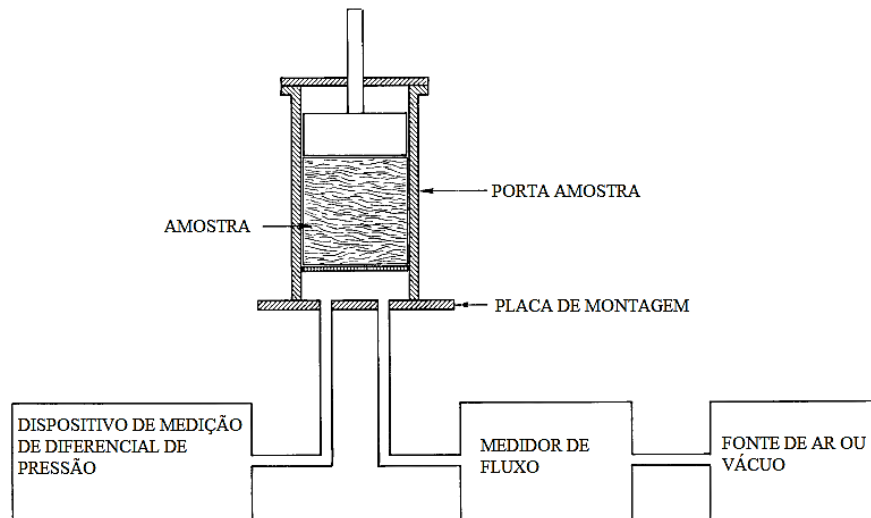
$$R_0 = \frac{P}{v} \quad (67)$$

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

$$\sigma = \frac{\Delta P}{vl} \quad (68)$$

Os valores de resistividade ao fluxo no experimento devem atingir de 100 a 10.000 Rayl, e a temperatura no ato do procedimento deve ser em torno de 22 ± 5 °C, para serem válidos pela norma ASTM C 522 (2012). A Figura 14 mostra um esquema de uma bancada de medição em conformidade com a norma.

Figura 14: Esquema ilustrativo do aparato de Resistividade ao fluxo



Fonte: Adaptado, Norma ASTM C 522, 2009.

3.2.2 Tortuosidade α_{∞}

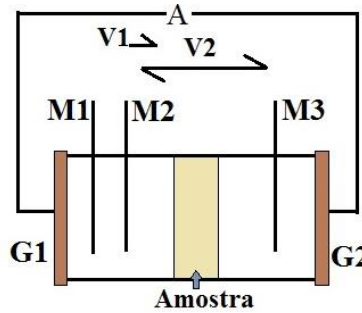
A tortuosidade α_{∞} é caracterizada pela influência da geométrica da estrutura interna do material, não sendo influenciada pelo fluido passante por ela. Segundo Biot (1955), a tortuosidade é ditada pela razão da energia cinemática da velocidade microscópica

molecular V de um fluido viscoso pela energia cinética de ondas macroscópicas $\bar{V}$, sendo calculada na eq. (69):

$$\alpha_{\infty} = \frac{V^2}{\bar{V}^2} \quad (69)$$

A tortuosidade α_{∞} de um material amostral é definida por Lauriks *et al.* (1994) através de um experimento em que uma amostra fibrosa ou porosa dentro de um tubo de PVC passa por uma condutividade elétrica em meio fluido. A seguir, na Figura 15, o desenho esquemático da bancada de tortuosidade.

Figura 15: Desenho esquemático da bancada de Medição de Tortuosidade



Fonte: A autora, 2024.

Sendo o seu valor calculado através da eq. (70).

$$\alpha_{\infty} = \Omega \frac{\sigma_a}{\sigma_l} \quad (70)$$

Em que Ω é a porosidade do material; σ_a é a resistividade da amostra; e σ_l é a resistividade do líquido. Recalculando, a equação, fica igual a eq. (71):

$$\alpha_{\infty} = \Omega \left(\frac{V_2}{V_1} \frac{d_1 - d_2}{d_l} - \frac{d_2 - d_3}{d_l} \right) \quad (71)$$

Em que V_1 é a potência do cabo elétrico 1 que passa do eletrodo M1 até M3; V_2 é a potência dos cabos elétricos 2 que passam do eletrodo M2 e M3; V_1 e V_2 fornecem as variações de potência; d_1 é a distância entre os eletrodos M1 e M2; d_2 é a distância entre os eletrodos M2 e M3; d_3 é a distância entre M3 e M1. Os eletrodos M1, M2 e M3 estão

localizados na parte anterior e posterior da amostra; G1 e G2 são eletrodos cilíndricos em forma de chapa, localizados nas extremidades do cano de PVC.

3.2.3 Porosidade Ω

A porosidade Ω determina a quantidade de poros existentes em um material poroso ou fibroso. Um material com porosidade alta, para a acústica, é considerado como um ótimo absorvente sonoro, pois toda energia sonora que por ele é captada, e, conseqüentemente, absorvida e transformada em calor. O que caracteriza a porosidade de um material voltado para acústica é a qualidade de seus poros, que devem ser abertos e conectados entre si. Com análise microscópica, é possível analisar os poros de uma amostra e medir dados de porosidade; materiais de poros fechados são descartados para absorção sonora. A porosidade de um material é calculada conforme a eq. (72).

$$\Omega = \frac{V_a}{V_t} \quad (72)$$

Em que V_a é o volume de ar dentro dos poros de um material e V_t é o volume total de um corpo amostral. Beranek (1942) calculou o volume de ar dentro de um corpo de prova, conforme as Equações (73 -76):

$$V_t = S\Delta x \quad (73)$$

$$V_m = S_2\Delta x_2 \quad (74)$$

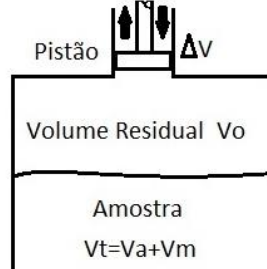
$$V_a = V_t - V_m = \Delta x_1 S + \Delta x_2 S_1 \quad (75)$$

$$\Omega = \frac{V_a}{V_t} = \frac{S\Delta x_1 + S_1\Delta x_2}{S\Delta x} = 1 - \frac{\Delta x_2}{\Delta x} \frac{1}{1 + \left(\frac{S_1}{S_2}\right)} \quad (76)$$

Considerando S_1 e S_2 como as faces das áreas dos materiais; Δx o volume inicial da amostra; $S\Delta x$ a soma do volume de ar; X_1 como o volume de massa da amostra X_2 ; $\bar{\rho}$ é a densidade média do volume de ar; V_m é o volume apenas da massa X_2 . Beranek considerou a lei dos gases ideais como base da sua equação de porosidade. Champoux *et al.* (1991) construíram um aparato para medição de porosidade de materiais porosos e fibrosos. A equação elaborada por Champoux *et al.* para aquisição da porosidade também tem como princípio a equação da lei dos gases ideais. Nesse caso, a temperatura é considerada

constante por se tratar de um meio que se comporta como isotérmico. A Figura 16 ilustra um croqui do aparato de medição por Champoux *et al.*

Figura 16: Aparato ou câmara de medição de porosidade



Fonte: Adaptado Champoux *et al.* (1991).

O aparato usado por Champoux *et al.* (1991) não faz o uso de água e tem base no trabalho de Beranek (1942). Consiste em modelo mais simples, em que uma amostra porosa de volume total V_t (material e ar) é composta por um volume de material V_m e de um volume de ar na amostra V_a (somente o ar da amostra). A amostra é colocada dentro da câmara ou aparato de porosidade e, então, o volume residual V_o é conhecido; o volume da câmara ΔV é causado pelo movimento do pistão, resultando na mudança da pressão interna $\Delta P'$ que será medida. Com isso, a relação entre V_a e V_t se caracterizará como o resultado da porosidade. E a porosidade Ω é calculada pela eq. (72). Entretanto, considerando o meio isotérmico e outros fatores, a eq. (72) obteve algumas modificações, em que o volume total de ar V' medido na câmara é a soma do volume residual V_o com o volume de ar V_a nos poros da amostra, sendo.

$$V' = V_o + V_a \quad (77)$$

O modelo de Champoux *et al.* teve como pressão inicial a atmosférica P_o , sendo o ΔV o aumento do volume causado pelo movimento do pistão. Com isso, há uma mudança de pressão que será $\Delta P'$, atendendo a uma expansão isotérmica de um gás ideal no aparato, de um V'' volume total de ar denominado como volume aparente, sendo V'' medido na câmara ou aparato com mudança de pressão.

$$P_o * V'' = (P_o + \Delta P') * (V'' + \Delta V) \quad (78)$$

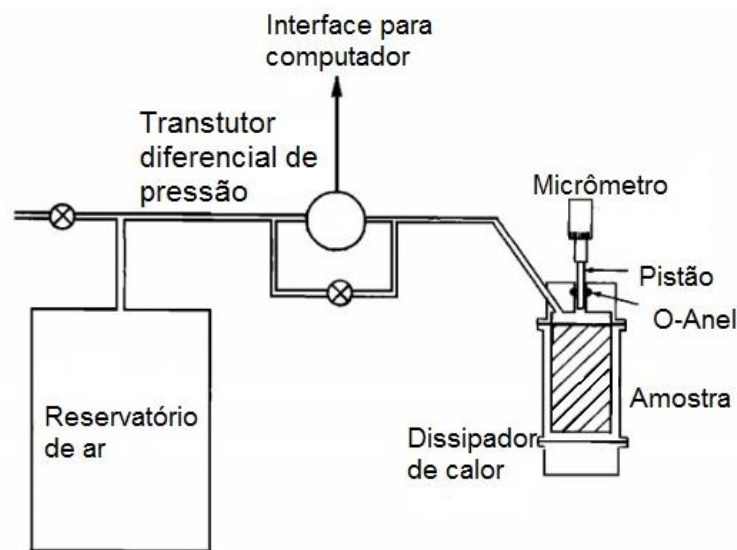
A mudança de pressão interna $\Delta P'$, conhecendo o valor de P_o e ΔV , mostra o volume aparente do volume total de ar V'' , na eq. (79) e o volume contido dentro da amostra V_a na eq. (80).

$$V'' = -[(P_o + \Delta P')/\Delta P'] * \Delta V \quad (79)$$

$$V_a = V' - V_o \quad (80)$$

Esse sistema de medição, vide Figura 16, não faz uso de água; também, não faz uso de um transdutor de pressão; porém, o aparelho se vale de um reservatório de ar, utilizando um princípio pelo qual a porosidade é medida pela mudança de pressão através de um manômetro conectado ao aparato lacrado. Através do movimento do pistão, a informação da pressão é ilustrada no transdutor de pressão, em um determinado tempo, caso a temperatura interna do aparato se apresente como isotérmica. A Figura 17 ilustra o método de medição de porosidade de Champoux *et al.*

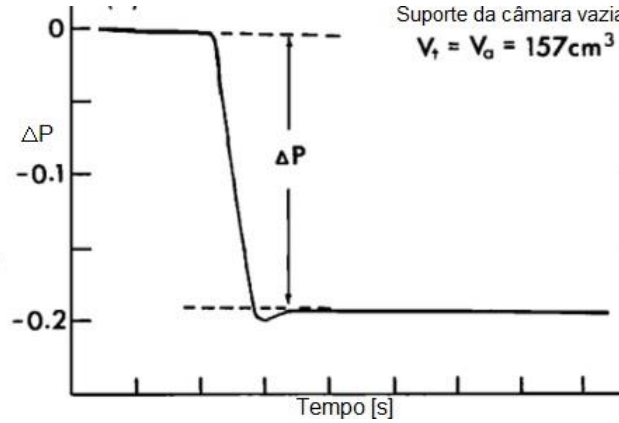
Figura 17: Sistema de medição de porosidade



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

O valor assintótico mostrado no transdutor de diferencial de pressão deve apresentar esse comportamento. O sistema deve ser calibrado para iniciar o experimento, conforme demonstra o gráfico da Figura 18 com os valores da câmara vazia com capacidade de volume de 157 cm³.

Figura 18: Gráfico assintótico da câmara vazia de porosidade com volume de 157 cm³



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

3.2.4 Impedância Z

A impedância acústica específica de um material é dada pela razão entre a pressão acústica no meio e a velocidade da partícula. Esta propriedade depende do meio e do tipo de onda incidente no corpo amostral. Para isso, é necessário calcular a impedância característica Z_c e o coeficiente de propagação ou o número de onda complexo k_c :

$$Z_c = X - iY \quad (81)$$

$$k_c = A - iB \quad (82)$$

Considerando que X é a resistência característica do material absorvente; Y é a reatância característica do material absorvente; A é a constante de propagação do material absorvente e B é a constante de atenuação do material absorvente. Delany e Bazley (1970) obtiveram duas quantidades complexas para propagação sonora dos materiais porosos e fibrosos, conforme a equação de impedância característica Z_c , sendo o coeficiente de propagação ou o número de onda complexo k_c , calculados respectivamente em:

$$\frac{Z_c}{Z_{ar}} = \left[1 + 0,0511 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,75} \right] - i \left[0,0768 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,73} \right] \quad (83)$$

$$\frac{K_c}{K_{ar}} = \left[1 + 0,0858 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,70} \right] - i \left[0,1749 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,59} \right] \quad (84)$$

Considerando válida na faixa de frequência calculada por:

$$10^{-2} < \frac{f}{r_0} < 1 \quad (85)$$

CAPÍTULO 4

ORIGEM DOS MATERIAIS

Introdução

Todo material existente na natureza tem seu início e fim, fechando um ciclo de vida natural. Para os produtos feitos pelo homem é razoável que o ciclo de vida dos materiais seja efetivo, sendo necessário o início e o fim desse material, não sobrecarregando o sistema planetário com resíduos com tempo de vida indeterminado. Cada ciclo de um dado produto ou material produzido na natureza deve passar por todas as etapas de decomposição até o fim da vida útil.

Para Pessoa e Martins (2007), o ciclo de vida de um produto segue basicamente uma sequência convencional em que há um produto que entra em desenvolvimento, chega ao seu uso máximo, entra em declínio e “desaparece”. Isso, porém, é válido para materiais de matriz orgânica, que, no fim da sua vida útil, a própria natureza se encarrega de finalizar o ciclo de vida através da decomposição. Embora esse processo pareça simples na sua totalidade, muitos produtos produzidos pelo homem não atingem essas etapas por terem base inteiramente sintética.

Medina (2006) descreve que os materiais são classificados como ecológicos conforme a base integrante de cada produto; com isso, o material entra no grupo de produtos recicláveis, biodegradáveis, verdes etc. Basicamente, alguns produtos com matriz petroquímica possuem um tempo de degradação não estimado ou absurdamente longo, com uma faixa de média de 5 a 500 anos, conforme afirma Nunes no blog Fiocruz.br. A Tabela 3 ilustra o tempo estimado de decomposição de alguns materiais.

Tabela 3: Tempo de decomposição de alguns materiais

Jornais	De 2 a 6 semanas
Embalagens de papel	De 3 a 6 meses
Fósforos e pontas de cigarros	2 anos
Chiclete	5 anos
Nylon	30 anos
Tampas de garrafas	150 anos
Latas de alumínio	De 200 a 500 anos
Isopor	400 anos
Plásticos	450 anos
Fralda descartável comum	450 anos
Vidro	1.000.000 de anos (um milhão)

Fonte: Adaptado Nunes (2024).

A investigação da origem de cada material é fundamental para o entendimento do seu rejeito final (Medina, 2006). Ou seja, ter o conhecimento dos componentes usados no processo de formação do produto facilita a destinação quando descartado após a sua vida útil.

Com isso, para esta tese, foi determinado que a matéria prima das amostras fosse parcialmente de origem vegetal para mitigar os impactos causados após a destinação final. Além das fibras selecionadas para produção das amostras, os polióis testados para a formação da espuma de poliuretano também foram selecionados de origem vegetal, tal como o poliol de mamona e o poliol de cana-de-açúcar. Os tópicos sequenciarão dados (plantio, a produção e os dados estatísticos) de cada componente, inseridos na produção das amostras, segundo as fontes da EMBRAPA e do IBGE.

4.1 Cana-de-açúcar

Conforme os dados da EMBRAPA, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (no primeiro semestre de 2024), contando com mais de sete milhões de hectares plantados, totalizando mais de 480 milhões de toneladas de cana. Além de matéria-prima para a produção de açúcar e álcool, conforme a Embrapa, os subprodutos da cana-de-açúcar e resíduos são utilizados para cogeração de energia elétrica, fabricação de ração animal e fertilizante para as lavouras. A classificação desta planta deriva das espécies de gramíneas perenes altas do gênero *Saccharum*, tribo *Andropogoneae*, nativas da Nova Guiné, regiões tropicais do sul da Ásia, e da Melanésia.

Afirmam Rossetto e Santiago (2022) que, para obter um plantio de canavial no Brasil, deve-se atender uma série de atribuições que vão desde a topografia à sistematização do terreno em congruência com a engenharia aplicada; além disso, deve-se ter em média entre 10 a 20 hectares de terreno para garantir o cultivo. É necessário atender a três etapas primordiais para se ter colheitas produtivas; são elas:

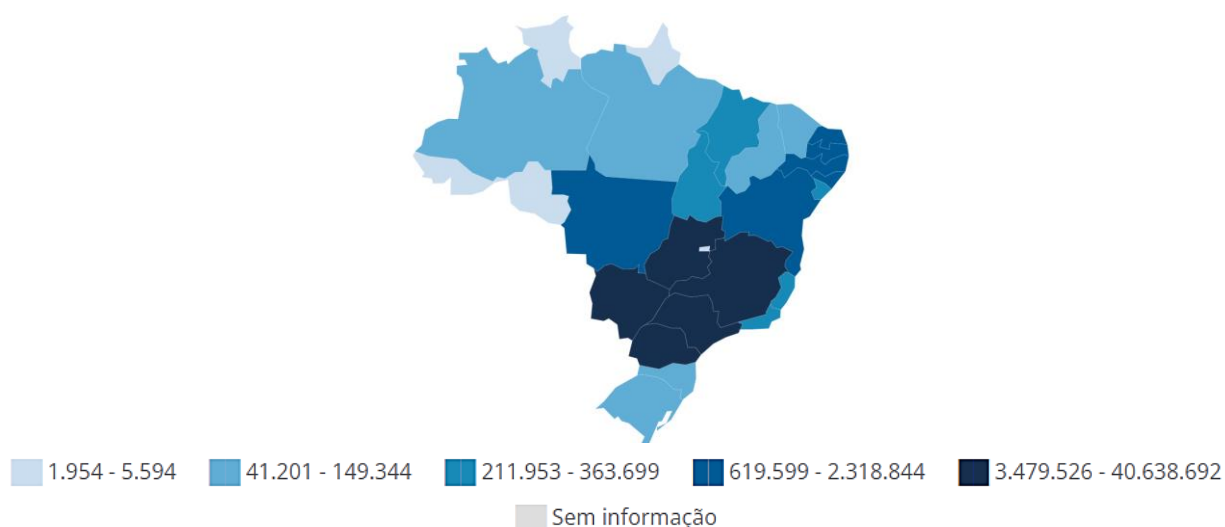
- Corte de mudas;
- Distribuição no sulco;
- Corte dos colmos em pedaços menores, dentro do sulco;
- Cobertura.

Ademais, a época do plantio adequada é fundamental para o bom desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, pois tem-se a necessidade de condições climáticas ideais para uma colheita saudável. Para o crescimento salubre da cana, deve-se considerar as suas necessidades, tais como: alta demanda de água, temperaturas elevadas e incidência solar. As melhores épocas do ano para o plantio são: o sistema de ano-e-meio, sistema de ano e plantio de inverno¹.

Segundo o IBGE, o Estado de São Paulo, localizado na Região Sudeste, apresenta a maior concentração do plantio e usinas de cana-de-açúcar, tendo, aproximadamente, 9.970.958 hectares (2021) só em plantio. Embora a Região Sudeste tenha a maior concentração de plantação da cana-de-açúcar, os Estados vizinhos, no Sudeste e no Sul, também se beneficiam da produção. O mapa a seguir, publicado pelo IBGE em 2021, ilustra os Estados com maior valor agregado do plantio da cana. No Brasil, a produção média da cana-de-açúcar é de 715.659.212 toneladas (2021) e a produção de cana-de-açúcar para safra de junho de 2023 foi estimada em 666.166.727 toneladas. A Figura 19 informa dados do IBGE de 2021.

¹ Sistema de ano-e-meio é uma técnica de cultivo de cana-de-açúcar que consiste em plantar a cana entre janeiro e março e colher entre 16 e 18 meses; O Sistema de plantio de ano consiste no plantio de cana-de-açúcar, em algumas regiões, no período de outubro a novembro; O Sistema de plantio de inverno usa o método da torta de filtro que contém cerca de 70 a 80% de umidade, aplicada no sulco de plantio; isso torna possível plantar a cana-de-açúcar mesmo no período de estiagem. Dados Embrapa - 22/02/2022.

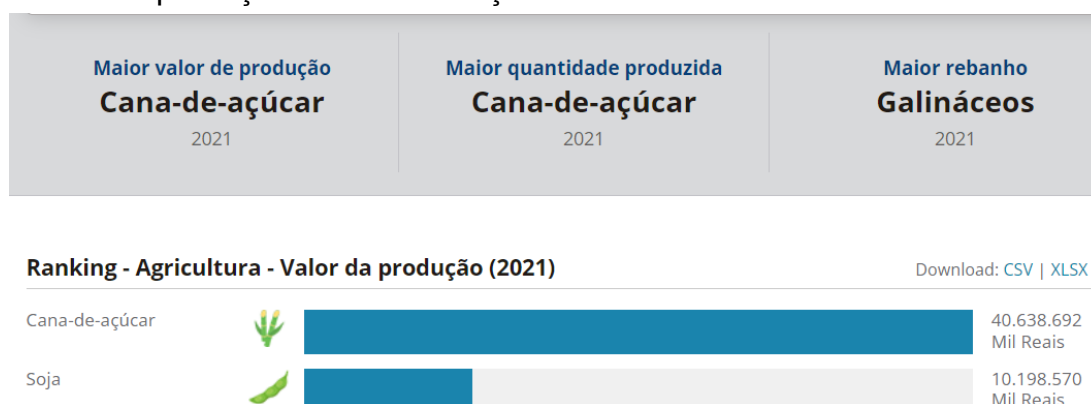
Figura 19: Mapa da concentração do plantio da cana-de-açúcar no Brasil na Região Sudeste



Fonte: IBGE, 2021.

O Estado de São Paulo (maior produtor da cana-de-açúcar no Brasil) tem a maior quantidade e o maior valor de produção, conforme o IBGE em 2021. (Figura 20).

Figura 20: Maior produção de cana-de-açúcar em São Paulo



Fonte: IBGE, 2021.

A Conab trouxe previsões de crescimento da produção para o ano de 2023/24, sendo de 4,4% em relação ao ano de 2022/23, estimada em 637,1 milhões de toneladas. Esse aumento é influenciado tanto pelo melhor rendimento das lavouras quanto pela maior área destinada ao plantio.

O Sudeste é a região com maior produção da cana-de-açúcar do Brasil. Entretanto o Centro-oeste vem se destacando por ser a segunda região que mais cultiva a gramínea, com uma estimativa de 140,9 milhões de toneladas e previsão de elevação de área de produção.

O bagaço da cana-de-açúcar

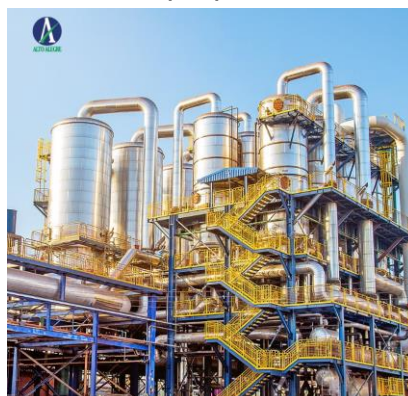
O site da Fapesp alude ao bagaço da cana-de-açúcar como o maior resíduo da agroindústria brasileira, sendo estimado que a cada ano sobrem entre 5 a 12 milhões de toneladas do bagaço. Embora se tenha uma demanda alta do resíduo, as próprias usinas utilizam cerca de 60% a 90% do bagaço como combustível e energia elétrica, substituindo o óleo no processo de aquecimento das caldeiras.

O bagaço da cana já é viabilizado comercialmente, principalmente na indústria de papel e papelão, na fabricação de aglomerados, na indústria química, como material alternativo da construção civil, como ração para animais e para a produção de biomassa microbiana. Embora exista esse aproveitamento pela indústria, ainda há um excedente alto que não é utilizado, causando agravantes sérios de estocagem e poluição ambiental. Esse excedente pode chegar de 10% nas indústrias com destilaria e 30% em usinas apenas com destilarias. Os principais componentes do bagaço da cana-de-açúcar são:

- 40% de celulose;
- 35% de hemicelulose;
- 15% de lignina.

Para produção das amostras estudadas nesta tese, foi utilizado o bagaço da cana-de-açúcar oriundo da Usina Alto Alegre, localizada no Estado de São Paulo. O bagaço cedido pela Usina era composto por excedentes desidratados. A Figura 21 mostra a Usina localizada em Santo Inácio (SP).

Figura 21: Usina Alto Alegre em Santo Inácio (SP).



Fonte: ig_acucaraltoalegre, 2023.

Para obter o bagaço da cana-de-açúcar, a gramínea passa por vários processos. Segundo o Blog Raizen, após a colheita, o caule passa por maquinário para que a cana seja moída e seja retirado dela o caldo; na sequência, etapas são executadas para captar seus derivados: Retirada do caldo do caule da cana-de-açúcar > Evaporação do caldo (Líquido transparente) > Cozimento e cristalização (Xarope) > Centrífuga do açúcar (Retirada do mel e do etanol) > Secagem do produto (Açúcar) > Peneiramento (Granulometria) > Separador magnético (Controle de segurança). A (Figura 22) descreve o fluxo da produção dos derivados da cana-de-açúcar conforme o Blog Raizen.

Figura 22: Gráfico das etapas de transformação da cana-de-açúcar em seus insumos



Fonte: Blog Raizen,2022.

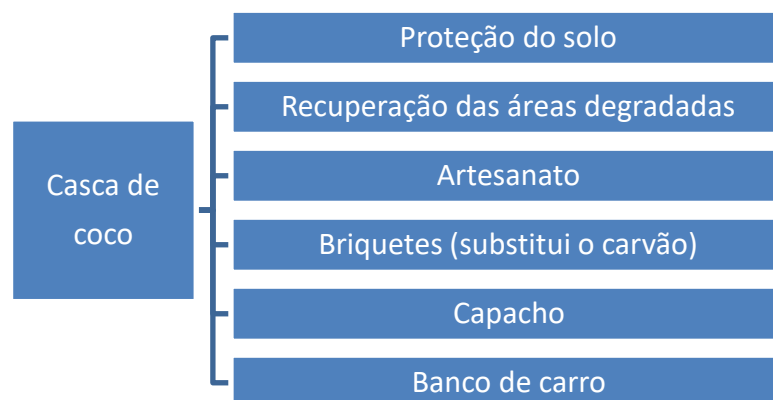
A fibra do bagaço da cana-de-açúcar produzido possui vários tamanhos, sendo necessário o processo de peneiramento para alcançar as medidas ideais de uso da fibra.

4.2Coco

Conforme a EMBRAPA, o gênero Cocos é constituído pela espécie Cocos nucifera L., a qual é composta pelas variedades Typica (var. Gigante) e Nana (var. Anã). Os híbridos de coqueiro mais utilizados são resultantes dos cruzamentos entre essas duas variedades, sendo o tipo de coco mais frequentes em território nacional. O coqueiro pode ser plantado em quase todas as regiões do Brasil, pois, embora seja uma planta tropical, o Brasil, como país de dimensão continental, possui clima diferente conforme a região. Para explorar todo

o potencial de um coco, é necessário observar onde será cultivada a planta, considerando as questões como o solo e clima, a seleção de sementes saudáveis, bem como a atenção para os cuidados no preparo da muda. O coco pode ser consumido in natura ou industrializado na forma de mais de 100 produtos e subprodutos; além disso, a casca gera diversos subprodutos de grande interesse econômico. Dentre as utilidades que a casca de coco pode oferecer, são elas:

Quadro 1: Utilidades do coco.



Fonte: Embrapa, 2021.

A produção do coco no país, segundo a Revista Campo e negócio, reduziu 17,11% entre os anos de 2007 e 2018 (dados do IBGE), mesmo gerando mais de um bilhão de dólares por ano; entretanto, o consumo da água da fruta aumentou 20% ao ano. A área de cultivo do coco, os coqueirais, foi reduzida de 283 mil hectares para 200 mil hectares, uma queda de 29,5%. Entre os Estados que mais cultivam a espécie, estão os das Regiões Nordeste e Norte entre os anos de 2007 à 2018, conforme os dados seguintes do IBGE:

- Bahia: 344,7 milhões de frutos;
- Ceará: 254,1 milhões;
- Pará: 191,8 milhões;
- Sergipe: 174,3 milhões;
- Espírito Santo: 150,1 milhões;
- Pernambuco: 139,5 milhões de frutos;
- Alagoas: 77,44 milhões de frutos;
- Rio Grande do Norte: 70,3 milhões de frutos.

Em 2021, a plantação de coco teve um aumento no Estado do Ceará, chegando a 1.638.573 frutos e, no Brasil, a ocupação do coqueiro foi de 186.392 hectares, conforme o Censo agropecuário/IBGE na Figura 23.

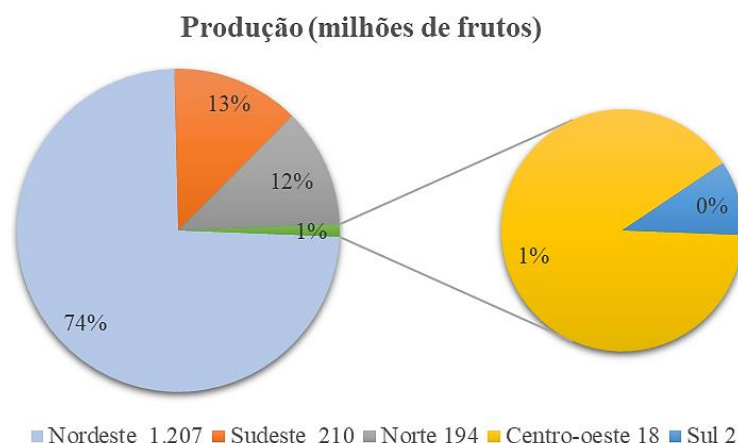
Figura 23: Dados da plantação de coco no Brasil

Valor da produção	1.299.188 Mil Reais (2021)	Estabelecimentos	37.515 Uni. (2017)
Quantidade produzida	1.638.573 Mil frutos (2021)	Números de pés	25.170 Mil uni. (2017)
Área colhida	186.392 ha (2021)	Maior produtor	Ceará (2021)
Rendimento médio	8.791/ha (2021)		

Fonte: Adaptado IBGE, 2021.

Segundo Brainer (2021), a Região Nordeste concentra 80,9% da área colhida no Brasil, possuindo o maior valor de produção (cerca de R\$ 719,44 milhões); entretanto, conta com baixa produtividade física e menor valor de vendas do fruto. Nas áreas litorâneas, ainda há o predomínio da variedade coco-gigante, que é um coco destinado a produção seca, coco seco. A produção de derivados do coco-gigante possui fortes práticas de manejo cultural e um ciclo de baixa adoção de tecnologias. Além dessa variedade de coco, o Nordeste possui municípios que fazem o cultivo do coco da variedade anã ou híbrida. Usam tecnologia que contribui para os rendimentos na região. O coqueiro está sendo cultivado em quase todo o Brasil, com área atual de 187,5 mil ha., com produção estimada de 1,6 bilhão de frutos. Além da Região Nordeste, a Região Sul também cultiva o coco, contudo em pequenas quantidades, cerca de 2 milhões de frutos em 2021, conforme os dados do IBGE em 2021 (Figura 24).

Figura 24: Plantio de coco no Brasil



Fonte: Adaptado IBGE, 2021.

A casca do coco

A casca de coco industrializada pode ser convertida em uma variedade alta de produtos, segundo o tipo de fibra. Quando misturada com látex, a fibra fica emborrachada e, com isso, é possível seu uso em manufatura de colchão de mola, e, entre outros, o estofamento de carros. Uma das principais características da fibra, segundo Nunes (2021), é a sua elasticidade e resistência, o que facilita a sua aplicação industrial. A fibra se destaca para fabricação de placas para isolamento térmico e acústico (Silva *et al.*, (2019), placas de aglomerados, estofados, tapetes, esponjas. A Figura 25 mostra a fibra de coco utilizada para fabricação das amostras desta tese.

Figura 25: Fibra da casca de coco.



Fonte: A autora, 2024.

4.3 Sisal

O sisal é da família: agavaceae e ordem: asparagales; conforme Santos (2011), é encontrado em todo o território nacional por se adaptar em clima tropical, sendo a Bahia o maior produtor do país, levando 90% da produção nacional, seguida dos Estados da Paraíba e Pernambuco. Hoje, a maior parte da produção de fibra de sisal é destinada à exportação.

O fio agrícola, feito da fibra do sisal, é responsável por 60% da exportação da fibra produzida na Bahia. No mercado interno, a fibra se direciona para os Estados do Paraná, Rio Grande do Sul, São Paulo, Goiás e Pernambuco. A produção da fibra para exportação se destina principalmente para a fabricação de tapetes, capachos, estofados e mantas para sela de montaria e artesanatos. Além disso, no território nacional, a fibra do sisal é utilizada para alimentação animal em época de estiagem (como feno ou ração), sendo transformada em alimento após passar pelo equipamento de “gaiola giratória”, que retira os insumos necessários.

Segundo Oliveira, colunista do jornal LeiamaisBa, nos últimos anos pesquisas guiadas para o maior aproveitamento desse subproduto vêm ganhando espaço, com a finalidade de ampliar o mercado para a cadeia alimentícia, juntando as propriedades da fibra de sisal com aditivos a fim de elevar os valores nutricionais. As imagens da Figura 26 ilustram trabalhadores extraíndo o sisal da cadeia de produção para retirada da fibra.

Figura 26: (a) Trabalhador colhendo sisal; (b) desfibradora para extração da fibra do sisal.



Fonte: LeiamaisBa, 2020.

A fibra do sisal

O sisal possui alta versatilidade, sendo quase tudo aproveitado na sua extração. Um dos principais beneficiamentos é a transformação em fibra destinada a vários produtos. Alguns exemplos do aproveitamento da fibra podem ser destacados como: fios, tapetes, cordas, cadeiras, peças decorativas, bolsas e sapatos.

Conforme o IBGE em 2021, o sisal ou agave, na cidade de Itaguaçu da Bahia, tem uma produção de 108 t, com uma área de colheita de 139 ha e rendimento médio de 777kg/ha. No Brasil, se tem uma quantidade total de produção de 98.403t, com área destinada a colheita de 100.727 ha e rendimento médio de 981 kg/ha. (Figura 27):

Figura 27: Dados IBGE sobre a produção de sisal no Brasil

FIBRA		
Quantidade produzida	98.403	t
Valor da produção	415.379,00	(x 1000) R\$
Área destinada à colheita	100.727	ha
Área colhida	100.280	ha
Rendimento médio	981	kg/ha

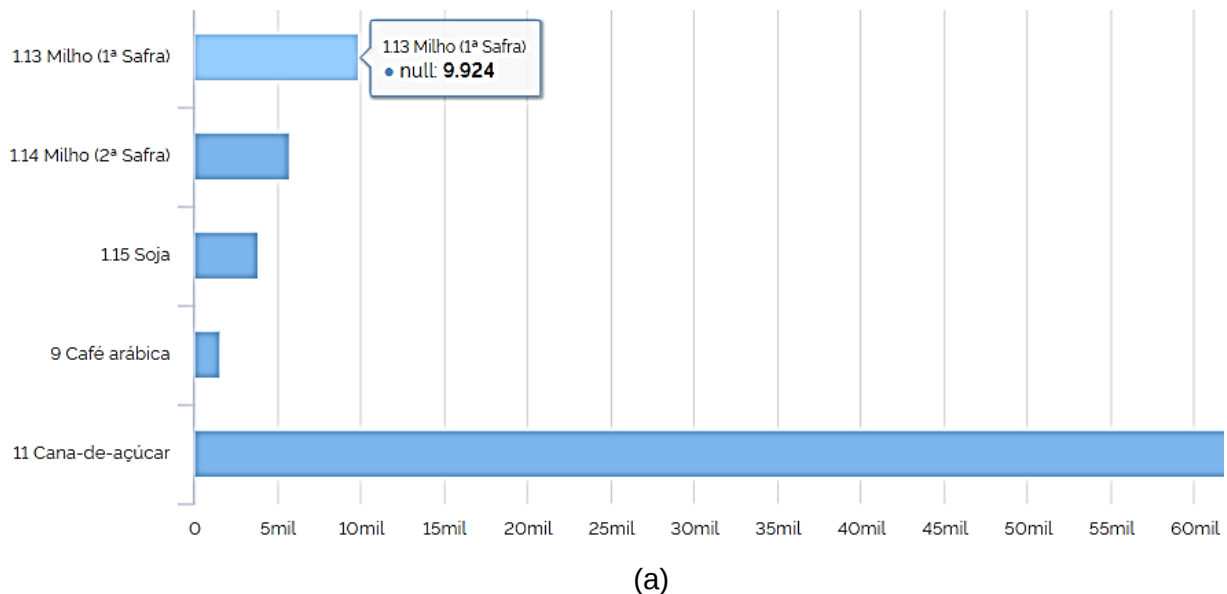
Fonte: IBGE, 2021.

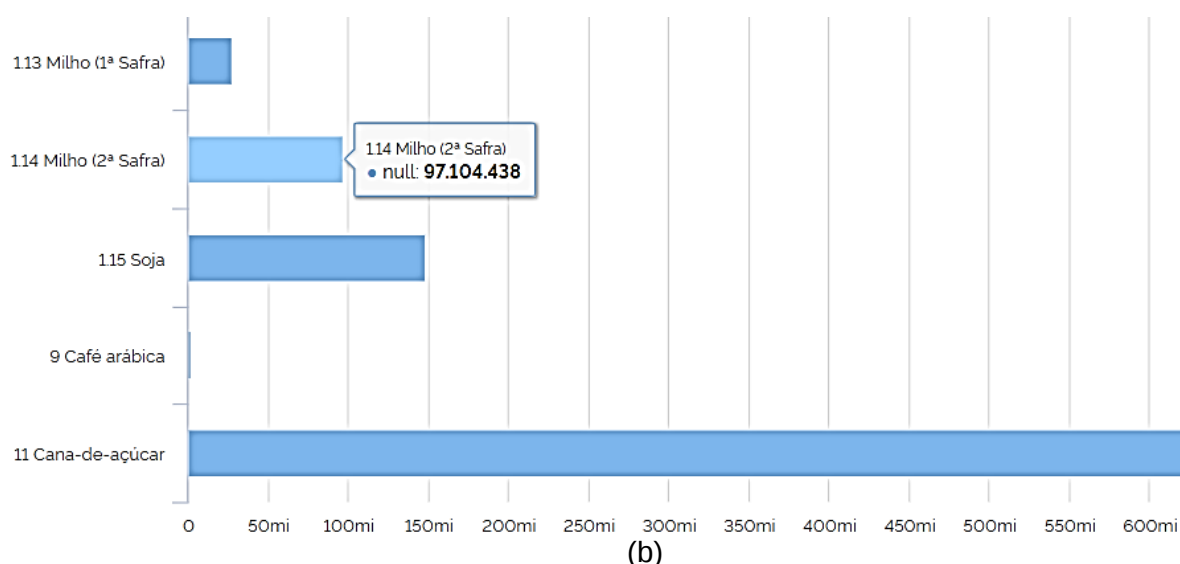
4.4 Milho

O milho pertence à família *Poaceae*, gênero *Zea* e espécie *Z. mays*. Segundo (FILHO; BORGHI, (2022), esse grão pertence a uma das maiores commodities do agronegócio do país, fazendo parte da alimentação humana e animal; além disso, na indústria, vem sendo fundamental para produção de bebidas, alimento industrializado, bioenergia e derivados. A sua relevância alimentar, in natura ou industrializado, faz que a sua exportação fique quase sempre no topo da produção agrícola. Na safra de 2022/23, aumentou o número de novas cultivares em relação ao dos anos anteriores, sendo que estas entregas do setor sementeiro coincidiram com o período de auge da pandemia da Covid-19.

Conforme a CONAB (2023), a previsão da produção de milho para os anos de 2022/23 foi de 125,8 milhões de toneladas, com uma alta estimada em 11,2% em relação ao ano de 2021. Conforme o site, o plantio de milho avançou em todas as regiões do país que são produtoras de cereal. Segundo o IBGE (2023), a plantação de milho no Paraná atingiu uma safra de quase 9.934 kg por hectare no mês de julho (Figura 28 (a)), enquanto que a produção nacional teve uma média aproximada de 10 mi no mesmo mês (Figura 28 (b)). Nas mesmas Figuras é possível analisar a grande porcentagem do plantio da cana-de-açúcar.

Figura 28: Em (a), o plantio de grãos de milho no Paraná. Em (b), a produção a nível nacional do milho





Fonte: IBGE, 2023.

A palha do milho

Quanto aos resíduos produzidos pela plantação do milho, tal como a palha, Arno *et al.*, (2008) mencionam a utilização dos resíduos orgânicos e a sua possível reciclagem através do uso da palha como adubação para produção de grãos e forragens. Além disso, uma lavoura de milho gera aproximadamente de 6 a 12 t ha⁻¹ de resíduo, sendo proporcional a quantidade de resíduo orgânico conforme o tamanho da lavoura. Por ser oriundo do milho, este resíduo possui altas quantidades de nutrientes que são temporariamente imobilizados, sendo liberados conforme o uso. Quando é incorporado ao solo, há liberação dos nutrientes, principalmente de nitrogênio. A taxa de liberação para a cultura subsequente depende do manejo destes. Se a palha do milho for incorporada ao solo, há aceleração da liberação de nutrientes; porém, caso essa massa orgânica seja colocada na superfície do solo, esse material desacelera a liberação de nutrientes, reduzindo a taxa de decomposição. A Tabela 4 apresenta a quantidade média de nutrientes imobilizados pela palha do milho na superfície do solo.

Tabela 4: Quantidade média de nutrientes encontrados na palha de milho

Palha (t há ⁻¹)	Nitrogênio	Fosforo	Potássio (kg há ⁻¹)	Cálcio	Magnésio
6-12	30-45	4-6	50-70	12-20	5-7

Fonte: Adaptado Embrapa Milho e sorgo, 2008.

A palha do milho possui várias alternativas de uso; uma das utilidades é o artesanato, como: bonecas, cestos, artesanato rural, dentre outros, ajudando na economia local. Como exemplo a Figura 29.

Figura 29: A palha usada como matéria-prima para produção de boneca e artesanato



Fonte: Embrapa, 2008.

4.5 Mamona

A mamona, ou *Ricinus communis* L. da família Euforbiáceas, é um arbusto que mede aproximadamente de 1 a 4m de altura. Segundo a Embrapa (EMBRAPA, 2021), a mamona é oriunda da África; entretanto, foi adaptada em quase toda extensão nacional, sendo frequentemente encontrada em áreas não inundáveis, áreas rurais, solos argilosos, arenosos e férteis.

Esse arbusto é mais frequente em todas as sub-regiões do Pantanal, sendo facilmente eliminado com o processo de roça e queimada. Deve-se ter cuidado para que esse arbusto não se propague em pastos, em rotas de condução de gado, pois, além das sementes, as folhas também são tóxicas.

Da semente da mamona é possível extrair o óleo, muito utilizado no país, pois possui múltiplas utilidades. Conforme Barros e Ramos (2022), a Índia oscila com o Brasil na maior produção de mamona; em 2004, a Índia era o maior produtor, devido a sua grande área cultivável, sendo sua produtividade de 1.238kg/ha.

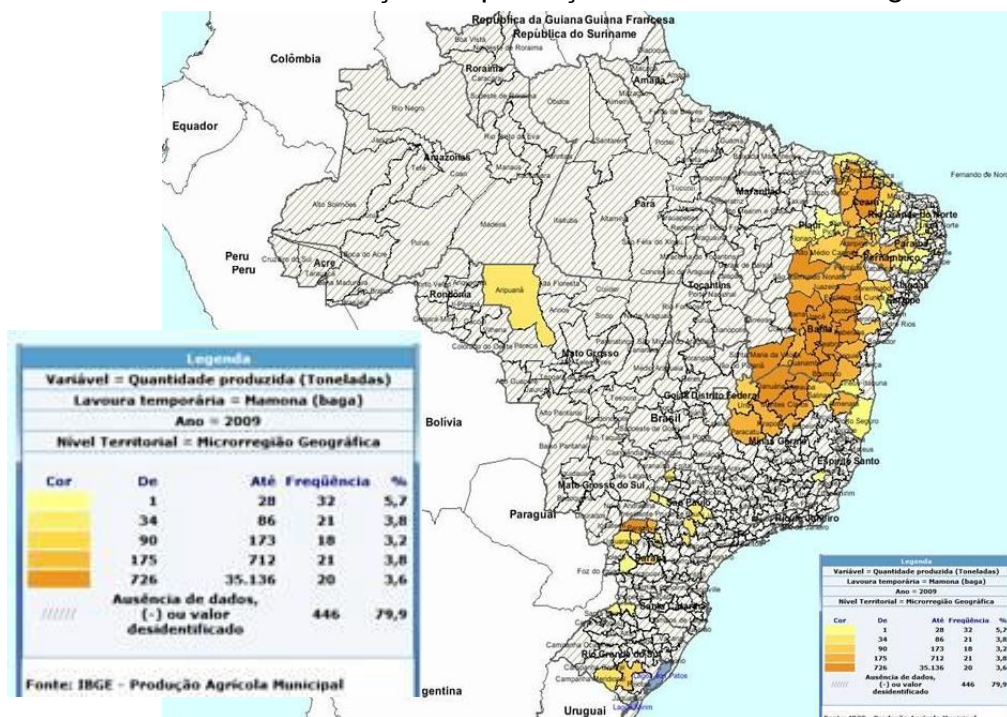
No Brasil, segundo a Conab, a produtividade média teve alcance em 2006 de 703 kg/há. A produção de mamona se concentra na Região Nordeste e a produção é realizada principalmente por pequenos produtores familiares.

O mapa da Figura 30 ilustra a concentração da lavoura de mamona na Região Nordeste. Dos Estados nordestinos, os que mais se destacam com a produção de manufaturas oriundas da mamona são os Estados da Bahia e do Ceará. A Companhia Nacional do

Abastecimento - Conab informa que a Bahia é o principal produtor de mamona, tendo um aumento de 2,5% em 2022.

Embora o Nordeste concentre a maior produção, no resto do país, a previsão da área cultivável é de 50,1 mil hectares com redução da produtividade de 13,8%. Conforme a mancha alaranjada no mapa anterior que apresenta a Região Nordeste tem a maior área de plantio de mamona.

Figura 30: Mancha da distribuição da produção da mamona na Região Nordeste



Fonte: SIDRA/IBGE, 2022.

Óleo da mamona

Medeiros (2022) menciona que a extração do óleo corresponde 50% do rendimento das sementes e possui maior predominância de triglicerídeos e ácido graxo ricinoleico. A presença de hidroxila (OH) na cadeia do ácido ricinoleico (C18:1,12-OH) contribui para uma variedade de produção de bens industriais com o uso de resinas poliméricas, tais como: prótese, revestimento de cabos e fios condutores, adesivos, graxas, plastificantes, a espuma com o poliol de mamona, dentre outros produtos. Segundo Pinto *et al.* (2009), o poliol tri-funcional do óleo de mamona possui propriedades que permitem a sua transformação e a sua adaptação a diferentes produtos. As principais características deste poliol são: reage como resistente a ataques aos solventes, produtos residuais e baixa absorção a água, sendo

indicado para recobrimento de circuitos eletrônicos, telefônico, área biomédica e construção civil.

Conforme Ogunniyi (2006) afirma, 90% dos ácidos graxos presentes no óleo de mamona correspondem ao ácido ricinolêico, que é o ácido 12-hidroxiolêico, sendo os 10% restantes referentes a ácidos graxos não hidroxilados, principalmente os ácidos linoleicos e oléicos, o que confere ao óleo de mamona uma funcionalidade média de 2,7 e um índice de hidroxilas médio de 163 mg de KOH/g. Ou seja, um produto com alto grau de pureza com ligações entrecruzadas nas cadeias poliméricas. A Figura 31 apresenta a semente da mamona.

Figura 31: Semente da mamona

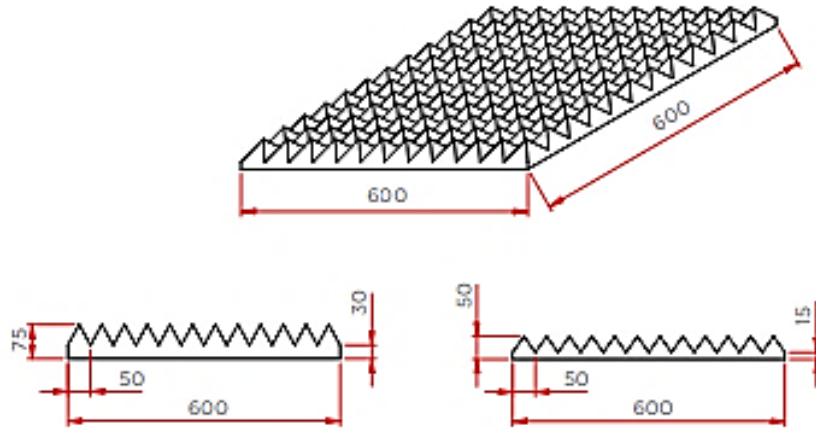


Fonte: Giselda Person / TG- G1, 2014.

4.6 Espuma de poliuretano, poliol de mamona e poliol de cana-de-açúcar

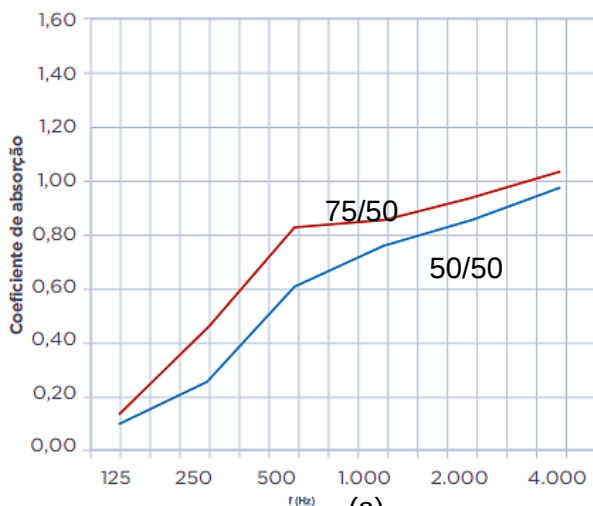
Poliuretano

A espuma é um material comumente usado para absorção sonora em superfície e seu uso se concentra em ambiente de áudio profissional. Segundo o fabricante Sonex (2024) (Sonex illtec - Perfilado - Sonex), o desempenho da espuma contribui para absorção devido a sua estrutura porosa que possibilita um elevado atrito na passagem do som, dissipando o ruído e fazendo com que parte do som refletido seja eliminado. Os esquemas da Figura 32 mostram as dimensões de uma placa de poliuretano comumente comercializada.

Figura 32: Placa de espuma piramidal de poliuretano e suas dimensões

Fonte: Catálogo SONEX, 2021.

Para obter o resultado, é necessário levar em consideração a característica semirrígida, a densidade e a espessura do material. Como exemplo, as espumas do fabricante Sonex possuem as espessuras de 50 mm e 75 mm e densidade de 11 kg/m^3 , sendo possível observar através do gráfico que, quanto maior a espessura, maior será a faixa de absorção e que as frequências da amostra de 75mm apresentam melhor desempenho. A Figura 33, demonstra o desempenho das amostras de espessura acima de 50 mm, com melhor alcance de absorção sonora nas faixas de frequência de 500 a 4000 Hz.

Figura 33: Desempenho das amostras (a); Tabela com relação da absorção pela frequência (b)

mm	f (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	NRC
50/50	—	0,08	0,24	0,60	0,75	0,85	0,97	0,65
75/50	—	0,12	0,44	0,82	0,85	0,93	1,03	0,80

Ensaio realizado conforme norma ISO 354

(b)

Fonte: SONEX, 2021.

Espuma de polioli de mamona

Além das espumas de poliuretano, conforme o tópico 2.1.8 do Cap. 2 (que explica a característica de bicomposto), existem outros tipos espumas derivadas de soluções menos agressivas ao meio ambiente, em que uma das partes do bicomposto, por exemplo, deriva da mamona ou da cana-de-açúcar. A mamona, mencionada no tópico anterior, é usada em várias cadeias produtivas e uma delas é a produção de espuma. Para se produzir espuma com o polioli de mamona, basta misturar com isocianato e a espuma é produzida em menos de 2 minutos; porém, uma das principais implicações é a sua característica rígida, que está associada ao seu alto índice de compressão.

Uma espuma com alto índice de compressão é uma medida de deformação permanente da espuma após uma ou várias compressões (Digikey, (2022)). Além disso, deve-se considerar as suas propriedades mecânicas e físicas, pois a produção do Poliuretano depende da sua massa molar, da composição, comprimento, presença de reticulações e ramificações (Meincken *et al.*, (2006)). A Figura 34 ilustra os compostos para produção da espuma. A espuma feita a partir do polioli de mamona tende a ser mais rígida, sendo usada na construção civil para preenchimento de cavidades.

Figura 34: Isocianato e Polioli de mamona



Fonte: João Adriano Rossignolo - Isocianato e polioli, 2016.

Espuma de polioli de cana-de-açúcar

O polioli extraído da cana-de-açúcar permite uma produção que segue as mesmas condições de preparo do PU convencional e do PU da mamona; porém, a espuma feita do polioli da cana-de-açúcar tende a ser menos rígida. O fornecedor do bicomposto indica todas as formas de procedimentos e manuseio da mistura, recomendando que quanto maior o índice de isocianato maior a rigidez da amostra. A Figura 35 expõe uma amostra

confeccionada a partir do polioli da cana-de-açúcar e isocianato. No capítulo 5, tópico 5.1.2, são abordados os métodos de produção desta amostra.

Figura 35: Amostra de espuma de Polioli de cana-de-açúcar



Fonte: A autora, 2024.

4.7 Tratamento antimoho e antichama

O mercado de acabamento vem buscando materiais de absorção acústica que possuam componentes antichama e antimoho; essa busca tem por objetivo as medidas de segurança e qualidade dos materiais em relação ao consumidor, conforme Audium (2020).

Para certificar-se de que os acabamentos estejam seguros e possuindo ambas as proteções (antichama e antimoho), é necessário que estejam em conformidade com as normas nacionais e internacionais, como por exemplo a NBR 9442-B e a NT 10/2014 (NORMA TÉCNICA, 2014) que são fundamentadas nas ASTM 662 E ISO 1182. Para que as amostras de fibras naturais fiquem dentro do padrão dos materiais comercializados, é necessário atender as normas vigentes.

Os materiais mais comuns usados como antimoho possuem em sua composição: cloridratos, compostos quaternários de amônia, glutaraldeído e água (Figura 36).

Figura 36: Pulverizador antimoho para superfícies



Fonte: Eucatex, 2024.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Introdução

Para metodologia desta tese, foram efetuadas várias avaliações das propriedades acústicas das amostras produzidas a partir das fibras naturais unidas ao compósito de PUMA (poliuretano de poliol de mamona) e PUCA (poliuretano de poliol de cana-de-açúcar). Este capítulo inicia com a prescrição da produção das amostras, seguindo com os métodos numéricos e métodos experimentais.

Das produções das amostras

- Amostras de espuma
 - Com poliol de mamona - PUMA;
 - Com poliol de cana-de-açúcar – PUCA;
 - Espuma com cama de amostras de fibra – PU_.
- Amostras de fibras naturais;
 - Amostra da fibra do bagaço da cana-de-açúcar - CN;
 - Amostra da fibra da casca de coco - CC;
 - Amostra da fibra da palha do sisal - SS;
 - Amostra da fibra da palha do milho.

As amostras, após produzidas individualmente, foram unidas, formando duas simples camadas, com duas faces distintas, sendo uma de fibra natural e a outra de espuma, originando uma única amostra. Foram formadas amostras de: Fibra de cana-de-açúcar e

poliuretano de PUCA – PUCN; fibra da casca de coco com poliuretano de PUCA – PUCC; fibra da palha do sisal com poliuretano de PUCA – PUSS.

Métodos numéricos

- Métodos clássicos;
- Modelo empírico.

Método experimental

- Medição de resistividade ao fluxo com tubo de impedância;
- Medições com a função de transferência das amostras;
 - Frequência 100-1600 Hz;
 - Frequência 400-6400 Hz;
- Método do fio quente na fibra de cana-de-açúcar;
- Método da granulometria por peneiramento na fibra de cana-de-açúcar;

5.1 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

Com intuito de investigar um material acústico para mitigar os impactos ambientais, foram fabricadas amostras com duas camadas distintas de texturas, sendo uma parcela de fibra de natural e a outra parcela de espuma. Entretanto, é importante enfatizar que a composição da espuma é feita com os bicompostos isocianato e um polioli extraído de uma matriz vegetal. Dentre os tipos de fibras, da parcela fibrosa da amostra, foram feitas amostras de fibra da palha do milho; fibra da casca do coco; fibra do bagaço da cana-de-açúcar e fibra da palha do sisal. Os tipos de polióis testados para fazer espuma foram dois, o polioli extraído da mamona PUMA e o polioli extraído da cana-de-açúcar PUCA. Todas as parcelas de fibra foram objetivadas a ter uma espessura aproximada de 10mm, enquanto que a parte espumosa de polioli vegetal tinha espessura de 5mm, formando uma proporção final de aproximadamente 15mm de espessura.

5.1.1 Espuma de poliuretano de Polioli de Mamona (PUMA)

A produção da espuma de PUMA foi realizada em razão da doação de amostra de isocianato e polioli oriundo de uma empresa privada. O material foi usado com a finalidade de realizar amostras para avaliação acústica. O material foi denominado como componentes B (polioli de mamona) e o componente A (isocianato).

Para a formação do produto final, a espuma, os compostos A e B foram misturados severamente em um frasco plástico, e, após obter uma característica homogênea, o material foi passado para outro recipiente, o molde, de maneira a permanecer até a sua cura definitiva. A formação da espuma é ligeiramente rápida; entretanto, em dias mais quentes, a cura tendia a ser mais acelerada, enquanto que, nos dias mais frios, a cura tendia a retardar o processo.

A produção

A espuma foi gerada de um bicomposto, que, ao ser manuseado, necessitava que os componentes fossem misturados imediatamente, para assim gerar um único composto formador, a espuma. Contudo, é informado pelo fabricante que a proporção de cada componente influencia diretamente na qualidade da espuma, sendo necessário dosar cada substância. Com esse fim, foi avaliado que, quanto maior a quantidade de polioli, mais a espuma tenderia a ficar macia e, por consequência, menos rígida.

Uma das características fundamentais a mencionar é quanto dureza da espuma que está relacionada com a quantidade do composto A. Em que quanto maior a composição de isocianato (composto A), maior rigidez a espuma teria. Segundo o fabricante, a recomendação para produção da espuma é que a quantidade de componentes fosse de 1/1, o que garantiria que a espuma apresentasse mais estabilidade na qualidade, e uma espuma com rigidez e maciez mediana. Embora essa proporção seja indicada pelo fabricante, a espuma do polioli de mamona é caracterizada por uma rigidez natural. Por isso, quando se trata de flexibilidade, esta espuma não garante esse comportamento, pois ao ser gerada as partículas de ligação química, no processo de mistura do bicomposto, adquirem rigidez mesmo diminuindo a quantidade de isocianato. Assim, após a cura, a amostra murcha, perde diâmetro, e com o tempo, enrijece, perdendo a estabilidade e sua eficiência de absorção.

Essa espuma formada a partir do polioli de mamona é um polioli de poliésteres aromáticos de baixo peso molecular. Conforme (Ogunniyi, 2006) 90% dos ácidos graxos presentes no óleo de mamona correspondem ao ácido ricinolêico, que é o ácido 12-hidroxiolêico, sendo que os 10% restantes são ácidos graxos não hidroxilados. Além disso, os ácidos linoleicos e oléico resultam em um produto obtido com alto grau de dureza. Logo a proporção de isocianato e polioli permite formação de ligações entrecruzadas nas cadeias poliméricas.

Os Polióis-poliésteres obtidos de poli (adipato de etileno) com hidroxila terminal, presente no polioli de mamona, são mais rígidos e possuem menor resistência a luz do sol e a hidrólise. Com isso, quando a produção da espuma é realizada na presença da claridade do dia, as amostras têm a predisposição a murchar antes da cura total. A Tabela 5 demonstra a composição química de espuma flexível, espuma semirrígida e espuma com maior rigidez.

Tabela 5: Espuma de mamona caracterizada pela sua rigidez provocada por oléico

Aplicação	Espuma Flexível	Espuma semirrígida	Espuma Rígida
Composição	ácido adípico, dietileno glicol, trimetilol, propano	ácido adípico, ácido ftálico, 1,2-propileno glicol, glicerina	ácido adípico, ácido ftálico, ácido oléico , trimetilol
PM	2400	1000	930
Nº de OH (mg KOH/g)	57-63	205-221	350-390
Teor de OH (meq/g)	1,1	3,8	6,6
Funcionalidade média*	2,7	3,8	6,2
Viscosidade a 75 °C (g/cm)	950-1100	570-750	1300-1550
Nº de acidez (máx.)	1,5	2,8	1
Densidade a 75°C (g/cm)	1,15	1,15	1,1

*funcionalidade média=peso molecular médio x teor de OH (meq/g)/1000

Fonte: Adaptado Poliuretanos.com, 2019.

A Figura 38 apresenta dois exemplos de espumas de PUMA, sendo a espuma mais rígida representada na Figura 38 (b); nesta foi adicionado mais isocianato, numa proporção 10/15, com 10g de polioli e 15g de isocianato. Na Figura 38 (c), a espuma está mais macia; neste caso, houve mais adição de polioli de mamona, sendo uma proporção de 12/10, 12g de polioli e 10g de isocianato. Para pesagem dos componentes, foi usada uma balança de precisão com três casas decimais.

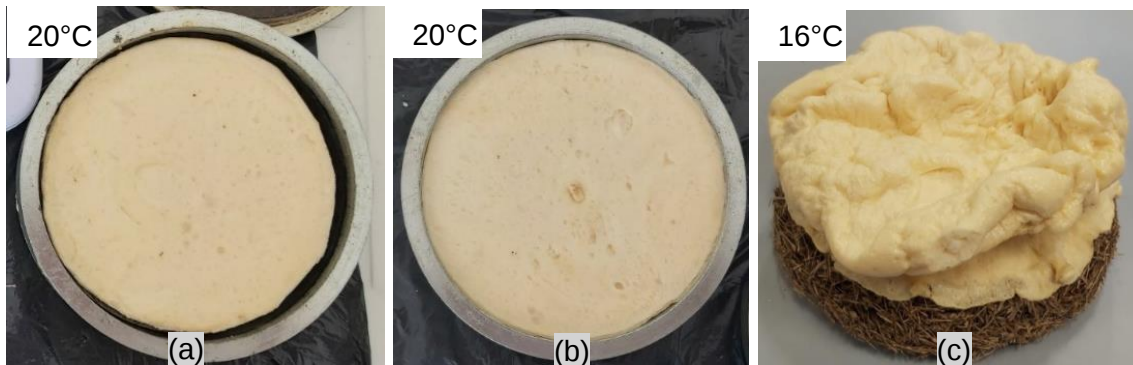
Figura 38: Componentes Isocianato_A e polioli de mamona_B (a); espuma de PUMA com mais isocianato e com maior rigidez (b); espuma com mais polioli e menos isocianato (c)



Fonte: A autora, 2024.

Na Figura 39, há três amostras em moldes com diâmetro de 100mm, sendo a imagem (a) com perda de diâmetro, redução do tamanho dos poros, tendo sido feita com menos isocianato. A imagem (b) exibe amostra feita com a proporção 1/1; esta espuma teve pouco murchamento no processo de cura, contudo apresentou maior rigidez. A amostra da imagem (c) foi produzida juntamente com a amostra fibrosa pronta, em que o bicomposto foi depositado em cima da amostra fibrosa. Ao gerar a espuma e o término do tempo de cura, a amostra apresentou a perda de diâmetro pelo efeito do murchamento; isso se deu por conter o dobro de polioli em relação ao isocianato na mistura. Além disso, a temperatura do dia, abaixo de 16° graus, não contribuiu para que a amostra resultasse em uma amostra mais consistente (ver p.82). As duas amostras (a e b) foram feitas no mesmo dia com temperatura de 20°C. A temperatura é um fator determinante para a produção das espumas; em um ambiente com temperatura controlada, as amostras tendem ser mais estáveis na cura.

Figura 39: Amostra (a) parcialmente murcha, amostra (b) maior rigidez e amostra com maior murchamento (c)

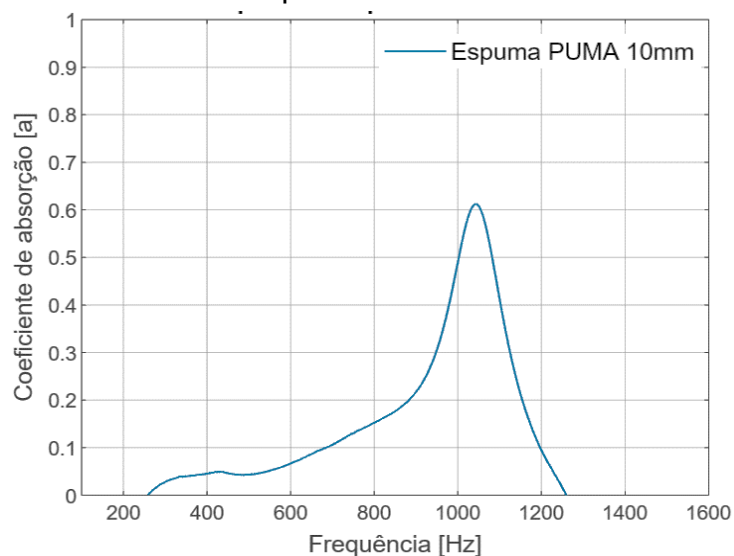


Fonte: A autora, 2024.

O polioli de mamona demonstrou ser promissor para a produção de espuma de poliuretano; entretanto, deve-se respeitar a dosagem de polioli e considerar um aditivo para garantir uma menor rigidez. Tal material não contribuiu para o manuseio nas medições, pois a sua alta rigidez resultou em quebra das bordas das amostras, além de absorção sonora inconsistente em determinadas faixas de frequências. Outra característica desta espuma são seus poros que reduzem após a cura, sendo percebido ao assoprar contra a amostra.

O Gráfico 1 apresenta avaliação em tubo de impedância com uma amostra de PUMA de 10 mm. A amostra apresentou resultado inconsistente após a faixa de frequência de 1200 Hz.

Gráfico 1: Amostras de PUMA com espessura de 10mm



Fonte: A autora, 2024.

5.1.2 Espuma de poliuretano de Polioli de Cana-de-açúcar (PUCA)

A espuma de poliuretano feita com polioli de cana-de-açúcar possui características de produção similar às da espuma feita com polioli de mamona, sendo manufaturada com a recomendação de 1/1. A espuma de polioli de cana-de-açúcar (PUCA) não apresentou a mesma rigidez da espuma de PUMA, o que contribuiu para as medições. Para produção da espuma de PUCA, é necessário apenas misturar o isocianato e o polioli, depositar no molde e aguardar a geração da espuma.

A produção

Uma das principais características desse bicomposto é a armazenagem que é recomendada em ambiente refrigerado, para evitar oxidação do produto. Oposto a isso é o processo da amostra, que deve ser mantido na temperatura ambiente, pois as substâncias, ao serem misturadas, produzem a espuma que se comporta melhor no processo de cura em ambientes abertos e dias com temperatura amena. Após a mistura aguardar a cura.

O bicomposto PUCA também foi doação de uma empresa anônima, cujo fornecedor recomendou o uso da espuma com base no sistema SistLiq Inj (sistema de espuma rígida de poliuretano apropriado para diversas aplicações). A Figura 40 ilustra os componentes da produção de PUCA, sendo o isocianato e polioli de cana-de-açúcar em (a), juntamente com a espuma gerada a partir deste poliuretano em (b).

Figura 40: Isocianato e polioli de cana-de-açúcar (a). Espuma PUCA (b)

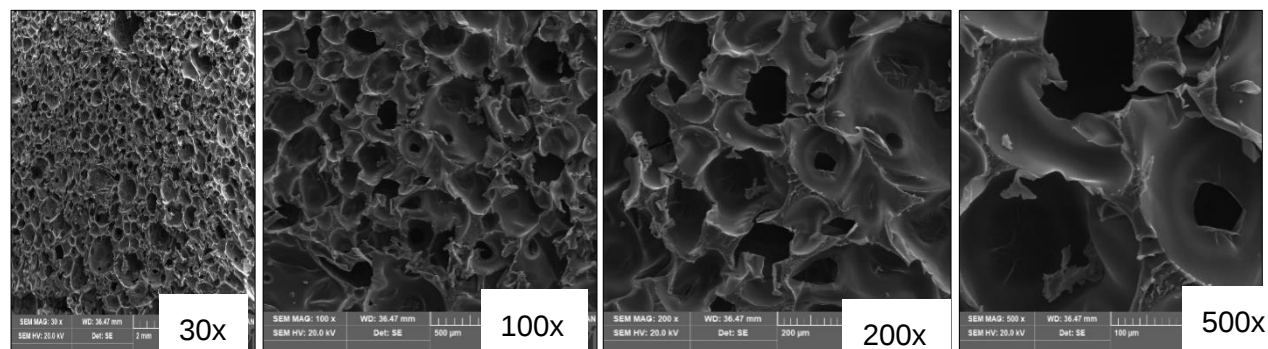


Fonte: A autora, 2024.

A flexibilidade e a maciez da espuma são alcançadas quando adicionada a proporção 1/0,9 (polioli/isocianato). Sendo assim, como mencionado anteriormente o isocianato é responsável em gerar o grau de dureza a espuma. Ao adicionar mais o isocianato, maior será a rigidez e, conseqüentemente, os poros se apresentam de tamanho menores, ao passo que, quanto maior a proporção de polioli, os poros irão se apresentar maiores e com estrutura

menos rígida. Na Figura 41 é possível observar as estruturas da amostra de PUCA com a estrutura parcialmente reticuladas, sendo analisadas em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), focalizada em 30x, 100x, 200x e 500x.

Figura 41: Espuma vista em MEV com alcance de 30x, 100x, 200x e 500x respectivamente



Fonte: Laboratório de microscopia eletrônica PUCPR, 2022.

As imagens foram feitas no Laboratório de Microscopia Eletrônica da PUCPR do Programa de Pós-graduação de Mecânica.

Para proporções de amostras maiores, a partir de 1m², o fabricante recomenda cálculos conforme o sistema SistLiq Inj, pois, a partir dele, é possível alcançar várias faixas de densidades, e, com isso, obter a melhor massa volumar conforme a finalidade da aplicação. Para amostras maiores, deve-se primeiro calcular o volume da amostra em m³ e, em seguida, a densidade em kg/m³, e assim obter a massa [M] da amostra, $M=v*d$. Com isso, alcança-se a proporção da mistura ideal de polioli e isocianato para 1kg de massa, sendo de 1,25:1,00 por peso. Sugestão do fabricante na (Tabela 6):

Tabela 6: Tabela de recomendações do fabricante SistLiq Inj

Condições de Processamento		
Densidade Livre	kg/m ³	25 a 29
Razão de Aplicação	Peso%A/B	125/100
Temp. Componentes	°C	25 a 30
Tempo de Creme	Seg.	20 a 35
Tempo de Gel	Seg.	100 a 130
Temp. de Pega Livre	Seg.	140 a 180
Propriedades Típicas		
Flamabilidade NBR7358		R1/R2
Células Fechadas	% min.	90
Absorção de Água	G/cm ²	0,05

Fonte: Adaptado SistLiq Inj, 2022.

5.1.3 Amostras de Fibras Naturais e Espuma

A parcela fibrosa das amostras foi produzida com uma proporção de fibra, água e adesivo PVA. A parte fibrosa das amostras foram manufaturadas com: fibra do bagaço de cana-de-açúcar; fibra da palha do sisal; fibra da casca do coco; além das amostras-teste de fibra da palha de milho; amostras-teste de conglomerada de fibra com espuma; amostras-teste só de espuma.

As principais característica das amostras de fibra foram a sua padronização de espessura aproximada de 10mm, anexadas a uma camada fina de espuma de PUCA (espuma de poliálcool de cana-de-açúcar), de 5mm, conforme a Figura 42. As amostras-teste ficaram com espessura de 10 e 15mm.

Figura 42: Esquema da amostra

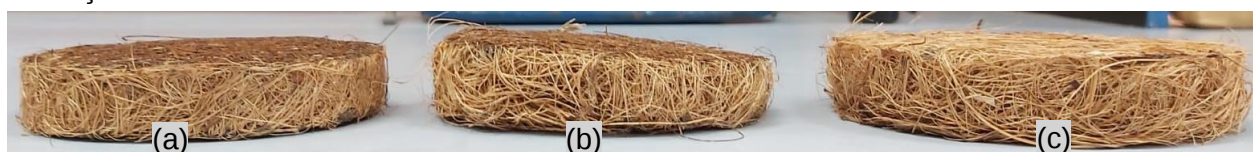


Fonte: A autora, 2024.

No ato da produção da parte fibrosa da amostra, foi constatado que cada tipo de fibra possuía suas características próprias, sendo fundamental respeitar cada proporção de cada componente para que a mistura originasse uma amostra mais confiável. Essa necessidade de entender o comportamento das fibras se faz presente para garantir a qualidade final da amostra e para não afetar os resultados das medições.

A Figura 43 apresenta três amostras: a amostra (a) com uma proporção maior de adesivo; amostra (b) com a mesma proporção de adesivo que a amostra (a), porém apresentando expansão da fibra devido o mal posicionamento da amostra no molde sob a prensa; e a amostra (c) com menos fibra na composição, menos adesivo e adição de água no adesivo, além de proporção de adesivo menor que as amostras (a) e (b). Foi observado que a expansão das amostras se deve a característica natural da fibra de coco que tende a dilatar quando hidratada. A imagem (a) e (b) contavam com maior quantidade de fibra e adesivo, o que favoreceu a hidratação das fibras e, por conseguinte, a sua maior dureza em (a) e maior dilatação em (b).

Figura 43: Três amostras de fibra de coco apresentando expansão das fibras por hidratação



Fonte: A autora, 2024.

Para conter esse fenômeno, as amostras devem curar sob a prensa; caso contrário, elas passam a apresentar maiores deformações da dilatação. As fibras naturais sempre irão demandar hidratação, sendo um comportamento natural do estágio da fibra desidratada. Logo, além do aglutinante, após a cura da amostra fibrosa, elas tendem a se hidratar com a umidade do meio circundante, sendo crucial colocá-las na estufa antes de cada medição.

As Figuras 44 e 45 mostram as amostras com duas camadas, uma de espuma de poliol de cana-de-açúcar (PU) e a outra de fibra natural de coco (CC), sisal (SS) e cana-de-açúcar (NC). Sendo amostras de fibra de coco e espuma (PUCC), fibra de sisal e espuma (PUSS) e fibra de cana-de-açúcar e espuma (PUCN). Na Figura 44, as amostras efetuadas para serem medidas em tubo de resistividade ao fluxo e impedância.

Figura 44: Amostras com camadas de fibra de espessura de 10 mm e de espuma de 5 mm



Fonte: A autora, 2024.

As amostras são caracterizadas por apresentarem duas superfícies distintas de materiais (Figura 44), se diferenciando dos estudos de (Bittencourt, 2018, p.46), que utilizou apenas camadas de amostras de fibra com espessura de 5mm; além disso, suas amostras foram produzidas com quantidades superiores de fibra e aglutinante.

Na Figura 45, as amostras são as mesmas da Figura 44; contudo, elas foram cortadas com o diâmetro 28 mm, permanecendo com as mesmas espessuras de 15 mm. As amostras foram cortadas em morsa. Posteriormente estas amostras foram medidas em um tubo de impedância de 28 mm de diâmetro (Cap. 6.2), nas frequências 400-6400 Hz.

Figura 45: Amostras 28 mm de diâmetro com dupla camada de fibra natural e espuma



Fonte: A autora, 2024.

Amostras testes

Além das amostras apresentadas nas Figuras anteriores, foram testados outros materiais, como a palha do milho e amostras conglomeradas de fibra e Poliuretano. Para as amostras feitas de fibra da palha do milho, houve a necessidade de acrescentar ácido acético (vinagre de álcool), uma tentativa de evitar a proliferação de mofo ou bolor na superfície da amostra fibrosa. Entretanto, a amostra foi descartada dos experimentos devido a dificuldade de preparo das fibras para produção das amostras, a persistência da proliferação de bolor e o desfazimento frequente das mostras no ato das medições. A Figura 46 apresenta a amostra com bolor em toda a sua superfície, o bolor se apresentou dias após o tempo de cura da amostra.

Figura 46: A amostra de fibra de milho com presença de bolor em toda a sua superfície



Fonte: A autora, 2024.

As amostras de fibras misturadas ou conglomeradas com espuma de PUCA, (Figura 47), foram produzidas com a mesma técnica de produção das espumas anteriores; contudo, para essas amostras, foram acrescentadas as fibras na composição da espuma. Para cada proporção de fibra uma proporção de polioli e isocianato, vide (Tabela 10).

Figura 47: Técnica de amostras conglomeradas com fibra e espuma



Fonte: A autora, 2024.

Esta mesma técnica foi feita por Samaei (Ehsan Samaei *et al.*, 2023), porém com fibra de cânhamo. Os autores objetivaram amostras com alta absorção sonora, usando espessuras de 40 mm. Para esta tese, esse tipo de amostra não apresentou características favoráveis ao estudo, pois apresentou estrutura mais rígida, com poros aparentemente menores. Além disso, a rigidez desta mistura facilitava a quebra das amostras mais finas, de espessuras de 5 a 10 mm, não sendo indicada para essas espessuras. A Figura 48 apresenta as amostras com espessura 30 mm.

Figura 48: Amostras aglomeradas com fibra e espuma



Fonte: A autora, 2024.

Amostras para medição

A quantidade de amostras estabelecidas para os experimentos foi de 30 unidades, sendo 10 de cada tipo de fibra (coco, sisal e cana-de-açúcar). Essa foi a quantidade considerada ideal para as medições. A Tabela 7 ilustra as quantidades de amostras que foram medidas posteriormente:

Tabela 7: Quantidades de amostras produzidas para os experimentos

Fibra da casca do coco + Poliuretano	10
Fibra da palha do sisal + Poliuretano	10
Fibra do bagaço da cana-de-açúcar + Poliuretano	10
Fibra da palha do milho + Poliuretano	teste
Fibras misturada com Poliuretano	teste

Fonte: A autora, 2024.

Quanto a densidade das amostras, as amostras de fibras naturais sem PUMA com espessuras de 10 mm alcançaram uma densidade menor que 120 kg/m³; as amostras individuais de espuma de PUMA (Poliuretano com poliol de mamona) alcançaram uma densidade maior que 120 kg/m³ e amostras de espuma de poliol de cana-de-açúcar ficaram com densidade abaixo de 100 kg/m³, tal como a Tabela 8:

Tabela 8: Espessuras e densidades das amostras fabricadas com Ø100 mm

Material	Espessura [mm]	Densidade [kg/m ³]
Casa - Coco	10,18	118,74
Bagaço - Cana-de-açúcar	9,17	107,47
Palha - sisal	9,00	117,15
Palha - milho	11,54	119,25
PUMA (mamona)	12,75	124,77
PUCA (cana-de-açúcar)	10,23	58,07
Mix espuma/fibra	10,50	60,30

Fonte: A autora, 2024.

A composição e a proporção de cada elemento das amostras de fibra com 100 mm de diâmetro e 10 mm de espessura seguiram as medidas da Tabela 9. Todas as amostras feitas seguiram um processo de análise empírica, em que, após prontas, eram analisadas em tubo de impedância. Cada amostra foi feita com dosagem específica de fibra e adesivo, com o objetivo de alcançar uma amostra mais absorviva, menos densa e com estabilidade suficiente para não se desfazer no ato das medições.

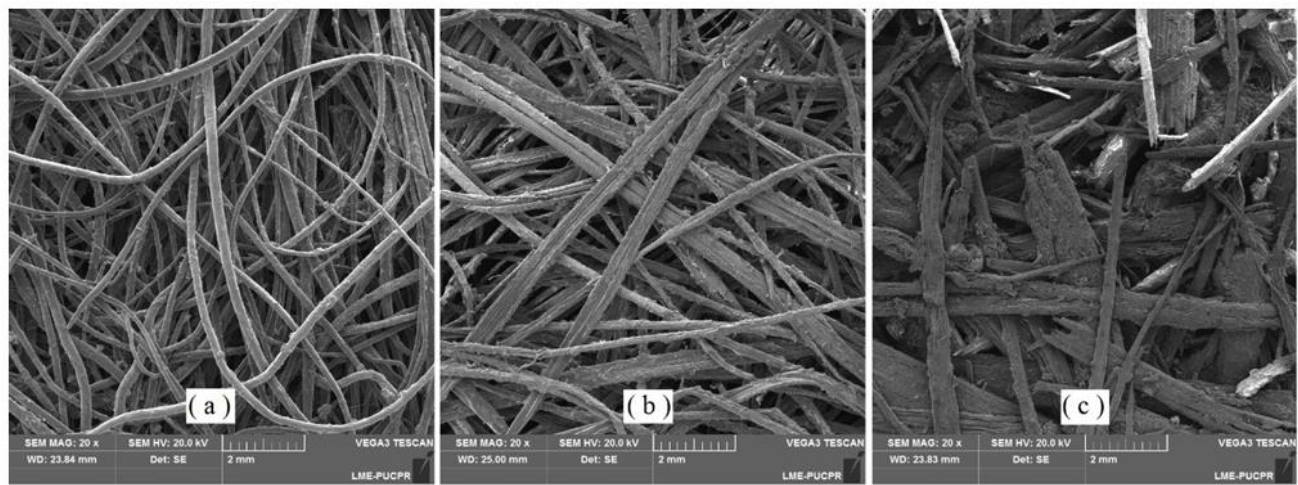
Tabela 9: Composição dos materiais das amostras de fibra natural e espessura 10mm

Fibra	Massa Inicial [g]	Cola [g]	Água [g]	Espessura [mm]	Volume [mm³]	Densidade [kg/m³]	Massa final [g]
Coco	6	4	4	10,18	75,795	118,74	9
Sisal	6	4	4	9,00	67,489	117,14	8
Cana	6	5	2	9,17	70,587	107,42	8
Milho	9	8	2+ (1 Ácido acético)	11,54	83,851	131,18	11

Fonte: A autora, 2024.

A parte de fibrosa das amostras (coco, sisal e cana-de-açúcar) demonstradas em MEV, permitem visualização mais detalhada das fibras; a Figura 49 ilustra as fibras de coco (a), sisal (b) e cana-de-açúcar (c) em um alcance de 20x, analisadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Programa de Engenharia Mecânica da PUCPR.

Figura 49: Análise das amostras de fibra de coco (a), sisal (b) e cana-de-açúcar (c) vistas em MEV



Fonte: LME-PUCPR, 2019.

Para a produção final das amostras de espuma de PUCA, foi considerado o melhor quantitativo em gramas com a proporção de 0,9/1 de isocianato e polioli. A (Tabela 10) apresenta todas as amostras feitas com espuma, além das amostras de PUCA e de PUMA as amostras conglomeradas com cada tipo de fibra (fibra e espuma misturadas).

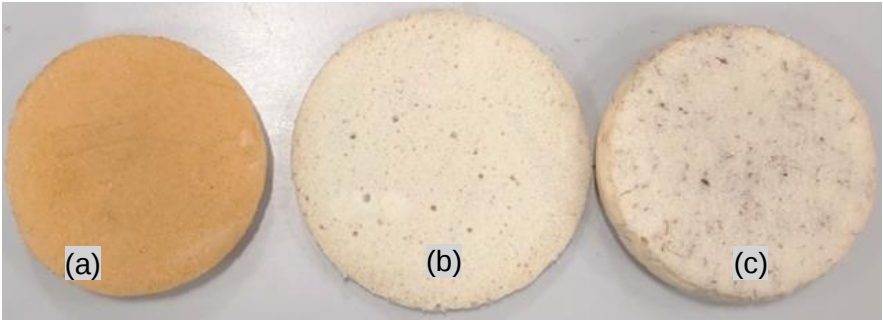
Tabela 10: Espessura e densidade das amostras de PUMA e PUCA

Espuma	Isocianato [g]	Poliol [g]	Fibra [g]
PUMA	11	11	-
PUCA	10	11	-
PUCA+fibra de coco	13	13	1,06
PUCA+fibra de sisal	12	12	1,01
PUCA+fibra de cana-de-açúcar	13	13	0,96

Fonte: A autora, 2024.

A Figura 50 demonstra três exemplos de amostras de espumas, sendo elas: as amostras de espuma de polioli de mamona PUMA (a), espuma de polioli de cana-de-açúcar-PUCA (b) e amostra com espuma de polioli e fibra de cana-de-açúcar (c).

Figura 50: Espuma de PUMA (a), PUCA (b) e conglomerada de fibra e PUCA (c)



Fonte: A autora, 2024.

A amostra de PUMA da Figura 50 (a) apresentou maior rigidez e maior retração após alcançar o tempo de cura; além disso, os poros são menores e fechados, tal como citado no item 5.2 deste capítulo. A amostra de espuma de polioli de cana-de-açúcar PUCA Figura 50(b) apresentou características opostas às da espuma de PUMA, sendo menos rígida e possuindo menor retração após a cura, além de a amostra apresentar maiores poros e espuma parcialmente reticulada; vide a microscopia eletrônica Figura 41. A amostra de PUCA+fibra (Figura 50(c)) apresentou maior rigidez e com poros menores, e, além disso, as fibras reagiram negativamente com a composição química do polioli e isocianato. A fibra misturada com PUCA gera um aumento do tempo de cura, acúmulo de material não misturados dentro das amostras, além da alta retração das amostras nas misturas com as fibras de coco e sisal. As amostras conglomeradas têm potencial favorável na acústica se forem rigorosamente misturadas, além de adicionar aditivos específicos que possam contribuir para a maciez e a porosidade das amostras quando misturadas com as fibras.

5.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

5.2.1 Equações empíricas de Delany e Basley (DB)

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

$$Z_c = R + iX \quad (86)$$

$$k_c = \alpha + i\beta \quad (87)$$

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

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

$$Z_{cp0c0} = 1 + 0.0511(f\sigma)^{-0.75} - i0.07688(f\sigma)^{-0.73} \quad (88)$$

$$k_{cp0c0} = 1 + 0.0858(f\sigma)^{-0.59} - i0.1749(f\sigma)^{-0.70} \quad (89)$$

Sendo ρ_0 a densidade característica no ar igual a $1.21[\text{kg/m}^3]$; c_0 é a velocidade do som igual a $343 [\text{m/s}]$ a 20°C . As frequências calculadas devem ficar nas faixas de $0.01 \leq f\sigma \leq 1.00$ e, acima desse valor, não é recomendável a exposição humana. Os valores de Z_c e k_c serão empregados na equação de impedância Z_c , em que Z_s é a impedância de superfície, i o número imaginário $i = \sqrt{-1}$, l a espessura da amostra.

$$Z_s = Z_c \cdot \coth(ik_c l) \quad (90)$$

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

$$\alpha_n = 1 - |Z_c - \rho_0 c_0 Z_s + \rho_0 c_0| / 2 \quad (91)$$

5.2.2 Método empírico de Allard e Champoux (AC)

Allard e Champoux (1991) mencionaram em seu trabalho as dificuldades de usar o método equacional de Delany e Bazley (1970) em frequências abaixo de 100 Hz, otimizando o método para ser usado em materiais fibrosos. Foi encontrada uma nova equação a partir da geometria do material, com base em representação física dos fenômenos acústicos associados com as diferentes propriedades físicas de materiais porosos, gerando resultados semelhantes nos intervalos de validade das equações de Delany e Bazley. Para iniciar a equação, Allard e Champoux usaram um modelo que não necessitaria de derivação, permitindo o uso mais direto através de duas variáveis $G1$ e $G2$. Conforme:

$$G1\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right) = \left[1 + i\pi\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)\right]^{1/2} \quad (92)$$

$$G2\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right) = G1\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right) 4N_{Pr} \quad (93)$$

Considerando ρ_0 a densidade do ar, N_{Pr} o número de Prandtl, f a frequência e σ a resistividade ao fluxo, a densidade dinâmica é calculada considerando a força de viscosidade inercial por unidade de volume de ar em um material, sendo dada por:

$$\rho(\omega) = \rho_0 + \left[1 + \frac{1}{i2\pi} \left(\frac{\sigma}{\rho_0 f}\right) G1\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)\right] \quad (94)$$

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

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left(\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + \frac{1}{i8\pi N_{Pr}} \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)^{-1} G2\left(\frac{\rho_0 f}{\sigma}\right)} \right)^{-1} \quad (95)$$

Sendo γ o calor específico, P_0 a pressão de equilíbrio no ar, f a frequência expressa em Hz e σ em [Pa.s/m²]. Usando a impedância característica $Z_c = \sqrt{\rho(\omega)K(\omega)}$ e o número de onda característico $kc = i2\pi f \sqrt{Z_c}$, a impedância da superfície Z_s pode ser calculada usando a variável l como espessura de uma amostra, podendo ser calculada pela eq. (96) e o coeficiente de absorção de energia incidente-normal α é derivado da impedância de superfície, eq. 97.

$$Z_s = Z_c(\omega) \coth kc(\omega)l \quad (96)$$

$$\alpha = 1 - \left| Z_c - \frac{\rho_0 c_0}{Z_s} + \rho_0 c_0 \right|^2 \quad (97)$$

As equações de 92-97 são utilizadas para caracterização de lã de vidro e lã de rocha com espessuras finas. Em caso de materiais fibrosos e com poros de parede rígidas e saturados em ar, a densidade de frequência dependente e o módulo de bulk foram trabalhados usando dois comprimentos característicos diferentes, como Λ e Λ' . Porém, para o acoplamento de ar viscoso e inercial em uma estrutura rígida porosa, a densidade de ar ρ_0 pode ser substituída pela densidade dinâmica $\rho(\omega)$, que dependente da frequência.

$$\rho(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty \left[1 + \frac{\sigma \Omega}{i \alpha_\infty \rho_0 \omega} \left(1 + \left(4 i \alpha_\infty 2 \frac{\eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \Omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right] \quad (98)$$

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

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \rho(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty \quad (99)$$

Em caso de poros cilíndricos que formam um ângulo Θ com a direção da propagação, a tortuosidade α_∞ será dada como a equação seguinte; contudo, considerando α_∞ como o fator da forma estrutural de ks , igual a:

$$\alpha_\infty = ks = 1/\cos^2 \theta \quad (100)$$

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

$$\Lambda = \left[\frac{2 \int |v(r)|^2 dV}{\Lambda \int |v(\omega)|^2 d\Lambda} \right]^{1/2} \quad (101)$$

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

$$\Lambda = s(8\eta\alpha^\infty\sigma\Omega)^{1/2} \quad (102)$$

5.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Para a compreensão dos parâmetros não acústicos e acústicos, foi necessário mencionar dois métodos. O primeiro método, resistividade ao fluxo, em conformidade com a ASTM C522-03, usa o fluxo de ar como a principal análise da resistência ao fluxo. O segundo método foi realizado conforme os estudos de Igard e Dear (1985), que mais tarde foram aprimorados por Bies e Hansen (1996); nesse método, a resistividade é avaliada através da pressão sonora. Os métodos serão melhor explanados no índice 5.3.1.

Além da resistividade ao fluxo, os métodos acústicos da função de transferência em tubo de impedância de 100 mm e 28 mm de diâmetro, avalia as amostras nas faixas de frequências de 100-1600 Hz para o tubo de 100 mm de diâmetro e de frequências de 400-6400 Hz para o tubo de 28 mm, conforme as indicações da ASTM 1005-E.

5.3.1 Resistividade ao fluxo

A resistividade ao fluxo σ é um experimento não acústico que afere uma amostra através de um sistema de componentes que permite dizer se o material tem resistência suficiente para dissipar a energia em seu interior. Com isso, fica relativamente fácil avaliar as propriedades do material junto a um modelo matemático que envolve em seus parâmetros de resistividade ao fluxo, tal como previsto por Allard & Champoux (1991). Para esta tese, não foi realizado o experimento com resistividade ao fluxo normatizado pela ASTM C522;

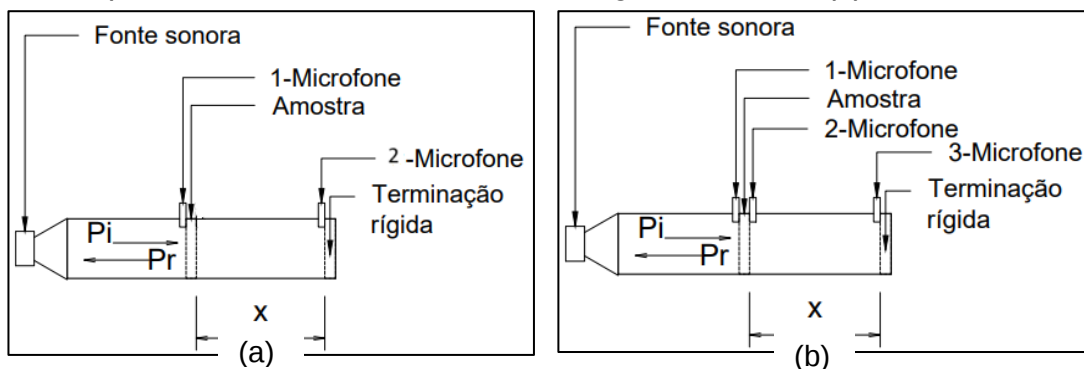
contudo, o método foi realizado conforme os modelos clássicos de resistividade ao fluxo com pressão sonora de Ingard e Dear e o de Bies e Hansen.

Resistividade ao fluxo com pressão sonora

Para dar suporte no experimento de resistividade ao fluxo com pressão sonora, dois trabalhos de grande relevância da comunidade científica foram avaliados. O primeiro método de Ingard e Dear (1985) e o segundo estudo de Bies e Hansen (1988). Ambos os estudos trataram de métodos que avaliam o som como parâmetro de resistividade ao fluxo com a pressão sonora em tubo de impedância, conforme seguinte.

O método Ingard e Dear (Ingard e Dear, 1985) foi executado com uma amostra posicionada dentro de um tubo, sendo este tubo com uma das extremidades uma terminação rígida e na outra uma fonte sonora. O método dos autores faz uso de dois microfones, sendo um antes da amostra e o último rente a terminação rígida do tubo (Figura 51 (a)). A Figura 51 (b) elucida um esquema da mesma técnica usada por Bies e Hansen (Bies e Hansen, 1988); contudo, os autores aprimoraram o método de Ingard e Dear, fazendo o uso de três microfones na medição. Os autores posicionaram o primeiro microfone a frente da amostra e recebendo a onda incidente; o segundo microfone foi posicionado após a amostra e o último microfone, próximo a terminação rígida. As duas técnicas são semelhantes, atendendo aos estudos aplicados nesta tese; entretanto, a técnica de Bies e Hansen foi considerada a mais apropriada para a construção da bancada de medições em resistividade ao fluxo para esta tese.

Figura 51: Esquema da bancada do método de Ingard/ Dear em (a) e Bies/ Hansen em (b)

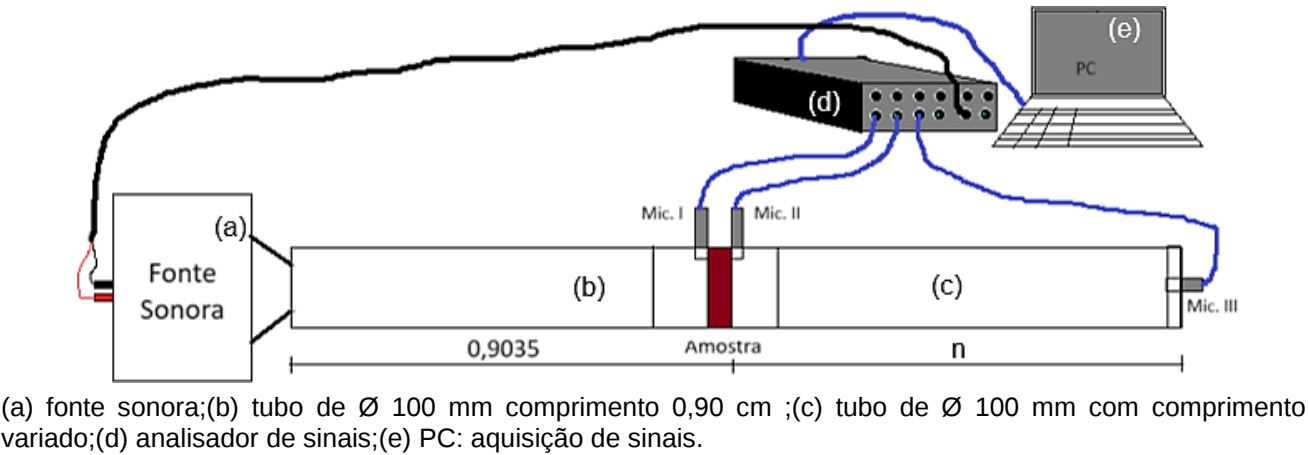


Fonte: Adaptado Ingard e Dier (a) (1985) e Bies e Hansen (b) (1988).

Para construção e montagem da bancada com pressão sonora foi necessário o aproveitamento dos tubos usados nas medições de função de transferência em impedância,

mantendo o mesmo diâmetro, assim evitando alterar as amostras. Embora o diâmetro tenha permanecido de 100 mm, a posição dos microfones foi alterada; além disso, foram usados três microfones, o primeiro antes da amostra, o segundo microfone depois da amostra e o terceiro microfone na terminação rígida, posicionado na horizontal. A bancada foi montada conforme a Figura 52, em que a fonte sonora, alto-falante, foi posicionado em uma caixa de MDF e fixada em uma das extremidades do tubo. O comprimento total do tubo ficou com 2,03 m; essa medida foi necessária para que o tubo alcançasse grandes comprimentos de ondas sonoras. Para esse comprimento, foi necessário unir três peças de tubo de alumínio, com paredes de espessura de 10 mm. A parte do tubo anexado a fonte sonora mede 0,9035 mm de comprimento, sendo conectado a outro tubo através de uma luva de conexão que ajusta a amostra e os dois microfones. Na outra extremidade do tubo, fica posicionada a terminação rígida, e nela fica inserido um microfone atravessado (Figura 52).

Figura 52: Croqui da bancada de Resistividade ao fluxo



Fonte: A autora, 2024.

A terminação rígida e o porta-amostra foram fabricados no Laboratório de Usinagem da PUCPR. Os materiais estão especificados de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11: Especificações dos componentes

Qtd	Descrição	Fabricante
1	Analisador e gerador de sinais, modelo 3160-A-042. Contendo 6 sinais, 4 d entrada e 2 de saída.	Briel & Kjaer
1	Amplificador de Potência, modelo 2706 de 10 Hz - 20 kHz, 75 VA.	Briel & Kjaer
3	3 Microfones, modelo 4189-A de ½" pré-polarizados e pré amplificados, com sensibilidade nominal variando entre 47,0 e 52,0 mV/Pa.	Briel & Kjaer
1	Fonte sonora	-

Fonte: A autora, 2024.

O analisador e gerador de sinais, Brüel & Kjær Type 3160-A-042, é de doze canais; contudo, fez-se o uso de três canais de entrada e um canal de saída (Figura 53).

Figura 53: Analisador e gerador de sinais da marca Brüel & Kjær Type 3160-A-042



Fonte: A autora, 2024.

Os microfones utilizados para a aquisição dos sinais foram de $\frac{1}{2}$ ", pré-polarizados, com pré-amplificadores e transdutores de identificação, com sensibilidade nominal de 5,6 mV/Pa, (Figura 54).

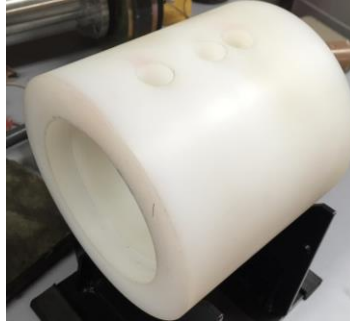
Figura 54: Em (a), os microfones da Brüel & Kjær Type 4937, 4938, 4939 pré-polarizados; em (b), dois microfones posicionados na luva do tubo de resistividade ao fluxo



Fonte: A autora, 2024.

Para posicionar os microfones 1 e 2, foi necessária uma luva de nylon, sendo utilizados apenas dois furos com diâmetro de 14 mm, similares aos dos microfones. As distâncias entre os microfones foram projetadas para adequar a amostra dentro da luva, obtendo, além da função de suporte dos microfones, a função de sustentação da amostra (Christan, 2018). O porta amostra fica entre os dois tubos, conforme a Figura 55.

Figura 55: Porta amostra e suporte para os microfones



Fonte: Christan, 2018.

Para o aperfeiçoamento da bancada de medição, em relação a bancada elaborada por Bies e Hansen, foi necessária a utilização de uma terminação rígida que permite a inserção de um microfone na direção axial, no meio da terminação rígida, conforme a Figura 56.

Figura 56: Terminação Rígida com entrada para 1 microfone de 1/2"



Fonte: A autora, 2024.

A análise sonora se deu por meio da propagação de ondas planas estacionárias dentro do tubo, que são obtidas quando comprimento de onda em propagação é muito maior que o diâmetro do tubo, tal como afirma Munjal (1987). Isso justifica a necessidade de uma bancada grande.

A seguir, a bancada para medição, com 2,03 m de comprimento, foi montada dentro da sala com vedação acústica. Os 8 pequenos tubos brancos visíveis na Figura 57 não foram manuseados, sendo 4 no tubo (d) e 4 no tubo (b), sendo todos vedados.

Figura 57: Bancada de resistividade ao fluxo com método de Ingard e Dier



(a) fonte sonora; (b) tubo de 0,903 cm de comprimento; (c) luva que posiciona os microfones 1 e 2; (d) tudo com comprimento ajustado conforme a necessidade da medição; (e) tubo com o microfone 3 no seu interior.

Fonte: A autora, 2024.

A temperatura e a umidade, dois parâmetros importantes que podem comprometer as medições, foram aferidas nas medições de resistividade ao fluxo, devido a inconstância do tempo e temperatura da Cidade de Curitiba. O equipamento termo-higrômetro da marca Minipa, tipo MTH 1361, foi usado para aferir a temperatura nos dias de medições, conforme a imagem da Figura 58 (a) e as amostras de fibra natural e espuma (PUCC, PUSS e PUCN) em (b).

Figura 58: Em (a), o termo-higrômetro e em (b) as amostras



Fonte: A autora, 2024.

Para calcular a resistividade de fluxo, foi aplicado o modelo matemático usado por Bies e Hansen (1980), eq. (103):

$$R = \frac{\rho c}{l} 10^{(NPS_1 - NPS_3)/20} \quad (103)$$

Considerando l a espessura da amostra, NPS_1 é o nível de pressão sonora do microfone 1, localizado antes da amostra, NPS_3 é o nível de pressão sonora do microfone 3, localizado na terminação rígida, ρ é a densidade do ar e c é a velocidade do som no ar que pode ser calculada em função da razão de calores específicos γ de 1,4 e da constante universal dos gases ideais $R_i = 287 \text{ J/kg}\times\text{K}$ e T da temperatura do ar em graus Célsius através Munjal (2013), eq. (104):

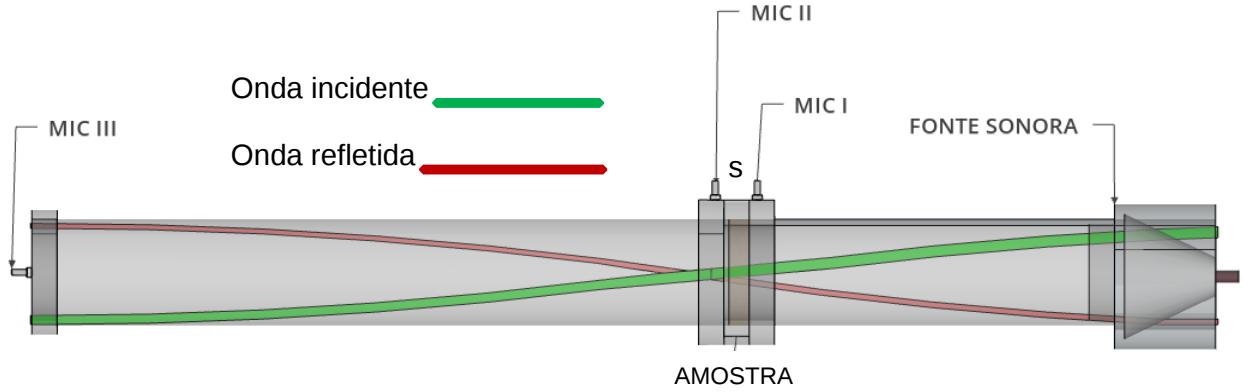
$$c = \sqrt{\gamma R_i (273 + T)} \quad (104)$$

Nas medições, em ambos os microfones posicionados na luva, foram utilizados anéis de borracha para evitar vazamentos durante os procedimentos experimentais. As etapas das medições foram realizadas através dos itens descritos a seguir:

- Posicionamento da amostra na 1ª luva logo após e o mais próximo possível ao microfone 1;
- O sinal emitido foi *Swept Sine* na frequência 155 Hz através da fonte sonora. Esta frequência, conforme o método, deve fornecer $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda estacionária dentro do tubo;
- Aquisição do valor de pico do sinal medido nos microfones 1 e 3 através do sistema de aquisição e sinais PULSE;
- Aquisição do nível de pressão sonora nos microfones. 1 e 3 através do *software Pulse Labshop*;
- Cálculo da resistividade através da Equação (103).

Conforme Gerges (2000) e Munjal (1987), no interior do tubo, o campo acústico é gerado com ondas estacionárias, que são alimentadas por um alto-falante com um sinal espectral de ruído branco que propaga dentro do tubo. O sinal gerado para esta medição foi conforme a frequência aproximada de 155 Hz, com $\frac{1}{4}$ do comprimento da onda no tubo de 2,18 m. O espectro de pressão sonora do campo acústico no interior do tubo foi determinado conforme as posições dos microfones 1, 2 e 3. Conforme o esquema da Figura 59.

Figura 59: Esquema da onda estacionária dentro do tubo de resistividade ao fluxo



Fonte: A autora, 2024.

É necessário verificar a frequência de corte, máxima e mínima, do tubo em análise. Considerando, tal como Bodén & Abom (1986), que abordam a existência de uma faixa de frequência na qual há uma boa precisão nas medições das propriedades acústicas dos materiais. Sendo, neste caso, s o espaçamento entre os microfones, k número de onda em propagação no interior do tubo e c a velocidade do som. Sendo que ks seja menor que $0,1\pi$ e maior que $0,8\pi$, conforme a eq. (105).

$$0,1\pi < ks < 0,8\pi \quad (105)$$

Substituindo o número de onda da eq. (105), tem-se as frequências mínima e máxima em que é esperado alcançar bons resultados, sendo expressas por:

$$f_{min} > \frac{0,1c}{2s} \quad (106)$$

$$f_{max} > \frac{0,8c}{2s} \quad (107)$$

As frequências mínima e máxima no tubo de resistividade ao fluxo foram aferidas considerando a temperatura no dia da medição $23,6^\circ\text{C}$, a velocidade do som c igual a $345,22\text{ m/s}$ e s igual a $0,10\text{ m}$ e a frequência de corte, conforme a eq. (108); assim, as frequências mínima, máxima e de corte ficaram de acordo com a Tabela 12:

$$f_c < 1,84 \frac{c}{\pi D} \quad (108)$$

Tabela 12: Frequências mínima, máxima e frequência de corte no tubo de resistividade ao fluxo

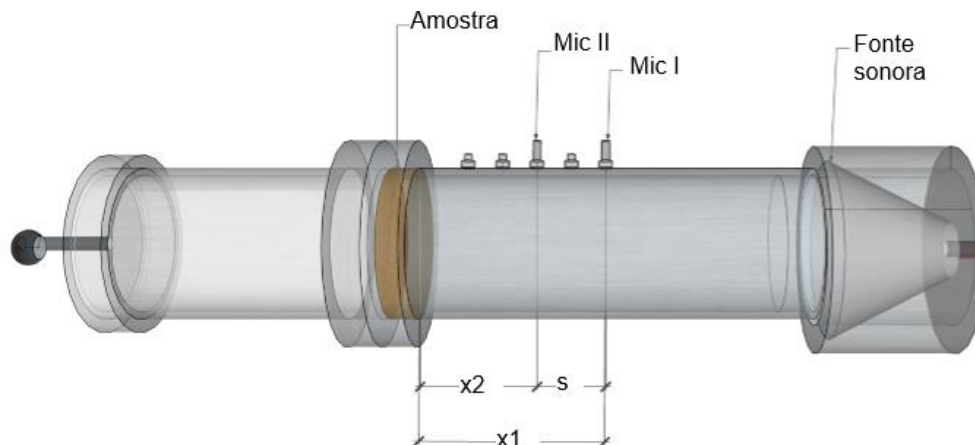
Frequências	[Hz]
f_{min}	172,60
$f_{m\acute{a}x}$	1380,88
f_c	2021.91

Fonte: A autora, 2024.

5.3.2 Função de transferência H12

O método da função de transferência H12, foi criado por Seybert & Ross (1977) e aperfeiçoado por Chung e Blaser (1980); hoje é dirigido pela norma ASTM E 1050 12, que orienta vários outros métodos de medições em tubo de impedância. Esta técnica foi utilizada, com finalidade de medir a pressão sonora nas amostras de fibras naturais, em dois pontos distintos, dentro do tubo através dos dois microfones. A ferramenta de uso de dados, o tubo de impedância, possibilitou medições em grandes faixas de frequências, em uma velocidade eficaz (Figura 60).

Figura 60: Ilustração do modelo do tubo de impedância usado nas medições como método da função de transferência



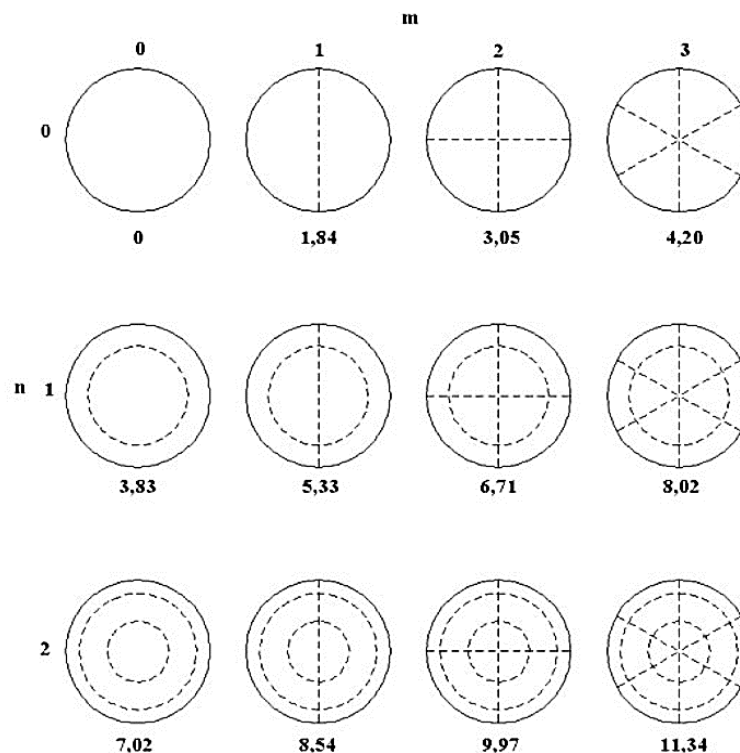
Fonte: A autora, 2024.

O tubo de impedância apresenta, em uma extremidade, uma fonte sonora e, na outra extremidade, um pistão (que posiciona a amostras corretamente no tubo). Os microfones ficam ajustados ao longo do tubo, separados por uma distância entre si “s”, em uma posição x_1 e x_2 da face frontal da amostra a ser medida, com uma pressão incidente P_i e pressão refletida P_r .

Os equipamentos utilizados para o método da função de transferência nas frequências de 100-1600 Hz, conforme a ASTM 1050 Chung e Blaser (1980a); Seybert e Ross (1977) foram: autofalante, microfone 1, microfone 2, tubo de impedância de $\varnothing 100\text{mm}$ e $\varnothing 28\text{ mm}$, analisador e gerador de sinais (Figura 62 -c), computador, além das amostras (Figura 62 -b). Para garantir que ocorra a propagação de ondas planas no interior do tubo, a frequência da onda sonora de excitação emitida pela fonte não deve ultrapassar a frequência de corte f_c , conforme a eq. (108). Nos dutos circulares, n representa o número de zeros da derivada J' , tal como foi dito no tópico 3.3, Cap. 3.

A (Figura 61) mostra a distribuição da pressão transversal em dutos circulares em que “ n ” corresponde ao número de nós circulares. A propagação de ondas planas é representada pelo modo (0,0) e os índices “ m ” e “ n ” apresentam o número de nós da distribuição de pressão nas suas respectivas direções, para linhas nodais para distribuição transversal de pressão os modos de ordem superior sendo $m=3$ e $n=2$.

Figura 61: Linhas nodais em duto circular



Fonte: Eriksson, 1980.

Alguns cuidados devem ser tomados para a realização de ensaios utilizando o tubo de impedância, segundo a norma ASTM E1050-12 (2012):

A superfície interna do tubo de impedância deve ser lisa, limpa e não porosa para evitar atenuação sonora;

A seção transversal do tubo deve manter-se constante ao longo de toda a extensão do tubo de impedância;

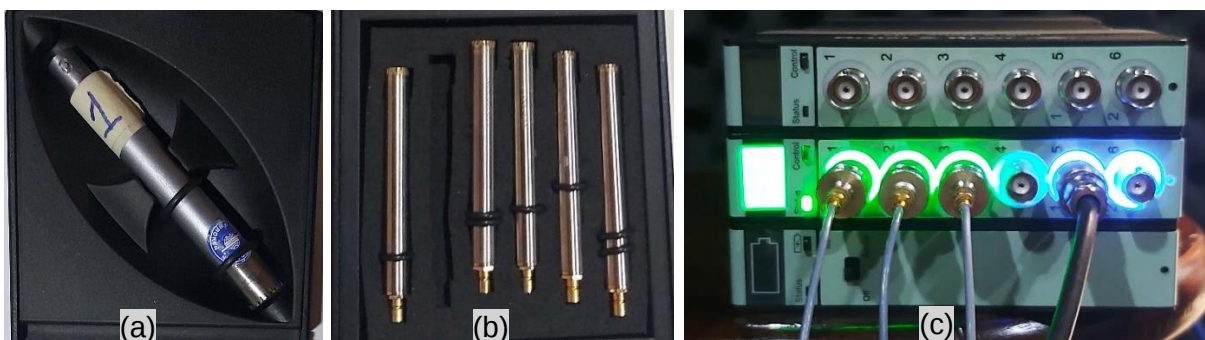
É necessária uma distância mínima de três vezes o diâmetro interno do tubo entre a fonte sonora e os microfones. Isso garante que ondas planas completamente desenvolvidas alcancem os microfones e a amostra;

É recomendado revestir o tubo de impedância com um material de absorção sonora próximo à fonte sonora com a finalidade de minimizar os efeitos da ressonância da coluna de ar no tubo;

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

Os tubos de impedância usados são da marca SCS 9020B/K, sendo especificamente o tubo de Ø100 mm para frequências de 100-1600 Hz e o tubo de Ø28 mm para frequência de 400-6400 Hz. O analisador e gerador de sinais é da marca Brüel & Kjær Type 3160-A-042 de doze canais, sendo quatro canais de entrada e dois canais de saída. Os microfones para a aquisição dos sinais foram o Brüel & Kjær Type 4935 de ½", para as frequências de 100-1600 Hz e o de ¼" para as frequências de 400-6400 Hz, ambos pré-polarizados, pré-amplificados, com transdutores de identificação e com sensibilidade nominal de 5,6 mV/Pa e 51 mV/Pa respectivamente. A (Figura 62) apresenta os microfones e o analisador de sinais usados nas medições, todos da marca Brüel & Kjær.

Figura 62: Em (a), o mic. de ½"; Em (b), mic. de ¼"; Em (c) o analisador e o gerador de sinais



Fonte: A autora, 2024.

A onda que propaga-se no interior de um tubo com o campo de pressão sonora é dada pela eq. (109):

$$P(x,t)=Ae^{i(\omega t-kx)}+Be^{i(\omega t+kx)} \quad (109)$$

Considerando as pressões p_1 e p_2 , no domínio do tempo, sendo medidas pelos microfones 1 e 2, conforme:

$$p_1(t)=Ae^{i(\omega t-kx_1)}+Be^{i(\omega t+kx_1)} \quad (110)$$

$$p_2(t)=Ae^{i(\omega t-kx_2)}+Be^{i(\omega t+kx_2)} \quad (111)$$

Em que A e B são as amplitudes das ondas que se propagam nas direções negativa e positiva, respectivamente, junto ao eixo x . Para equacionar a função de transferência H_{12} dos microfones 1 e 2, é necessário ter a razão entre a pressão p_2 , medida no microfone 2, em relação a pressão p_1 medida no microfone 1. A função de transferência H_{12} pode ser calculada com a eq. (112):

$$H_{12}(f)=\frac{p_2(t)}{p_1(t)}=\frac{(Ae^{i(\omega t+kx_2)}+Be^{i(\omega t-kx_2)})}{(Ae^{i(\omega t+kx_1)}+Be^{i(\omega t-kx_1)})} \quad (112)$$

A eq. (112) pode ser melhor entendida, de maneira que simplifique nos termos semelhantes do numerador e denominador, e com isso, divida a amplitude da onda progressiva do numerador B pelo denominador A ; tendo:

$$H_{12}(f)=\frac{\left(\frac{e^{ikx_2}+B}{Ae^{-ikx_2}}\right)}{\left(\frac{e^{ikx_1}+BA}{e^{-ikx_1}}\right)} \quad (113)$$

O coeficiente de reflexão sonora $R(f)$ pode ser calculado entre a razão da amplitude da onda refletida com a amplitude da onda incidente, conforme Allard e Atalla (2009) e Munjal (2013), eq. (114):

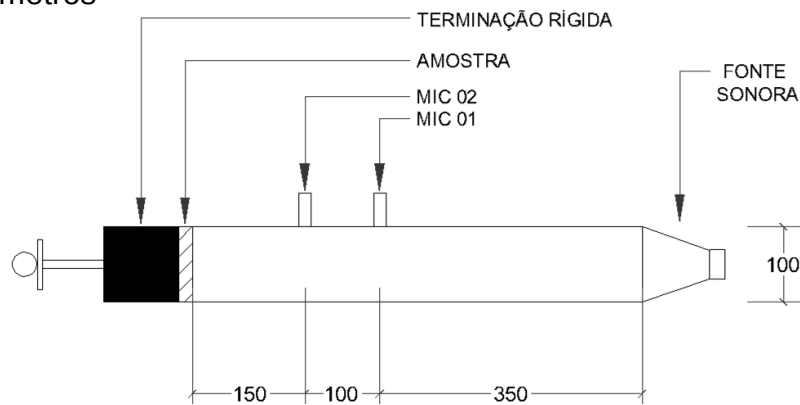
$$R(f)=\left|\frac{B}{A}\right| \quad (114)$$

No caso da ocorrência da dissipação de energia sonora no interior da amostra, a amplitude da onda refletida é menor que a amplitude da onda incidente. Com a eq. (113) e eq. (114), pode-se obter o coeficiente de reflexão $R(f)$ em função da função de transferência H_{12} .

$$R(f) = \frac{(H_{12}e^{ikx^1} - e^{ikx^2})}{(e^{-ikx^2} - H_{12}e^{-ikx^1})} \quad (115)$$

As Figuras 63 e 64 apresentam as distâncias dos microfones e as dimensões do tubo de impedância para calcular e gerar os dados da função de transferências.

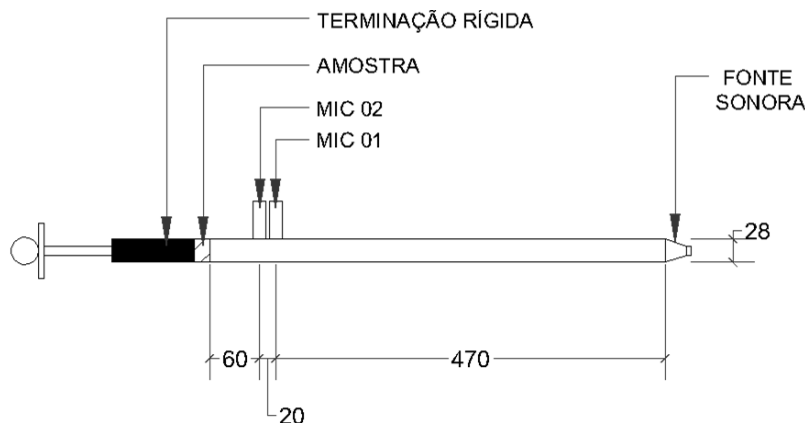
Figura 63: Esquema do tubo de impedância, diâmetro 100 mm, e distâncias dos microfones em milímetros



Fonte: A autora, 2024.

O tubo de medição para frequência 400-6400 Hz possui duas entradas de microfones e seu diâmetro é de 28 mm, (Figura 64):

Figura 64: Esquema do tubo de impedância, diâmetro 28 mm, e distâncias dos microfones em milímetros



Fonte: A autora, 2024.

De acordo com os dados da Figura 64, considerando $x_2 = x_1 - s$ e substituindo o valor de x_2 na eq. (115), tem-se:

$$R(f) = \frac{H_{12} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}} e^{2ikx_1} \quad (116)$$

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

$$\alpha(f) = 1 - |R|^2 \quad (117)$$

A impedância superficial Z_s , Seybert & Ross (1977), da amostra é obtida através da eq. (118).

$$Z_s(f) = Z_{ar} \frac{1+R}{1-R} \quad (118)$$

Em que a impedância característica do ar é $Z_{ar} = \rho_{ar} c$.

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

$$H_{12}(f) = \frac{P_2(f)}{P_1(f)} = \frac{G_{12}(f)}{G_{11}(f)} \quad (119)$$

Considerando $G_{11}(f)$ como a densidade de auto espectral ou o espectro de potência do microfone 1. O $G_{12}(f)$ é a densidade espectral cruzada ou o espectro cruzado de potência do microfone 2 em relação ao microfone 1. As duas densidades G_{11} e G_{12} podem ser obtidas conforme as equações (120) e (121), respectivamente.

$$G_{11}(f) = \frac{1}{2} [P_1(f)P_1^*(f)] \quad (120)$$

$$G_{12}(f) = \frac{1}{2} [P_2(f)P_1^*(f)] \quad (121)$$

Em que o sobrescrito $(\cdot)^*$ é denominado como um complexo conjugado. No caso em que o denominador da eq. (115) tende a zero, o coeficiente de reflexão torna-se indeterminado, sendo:

$$eiks-H12=0 \quad (122)$$

Isso ocorre quando o produto entre o número de onda em propagação k no interior do tubo e o espaçamento entre os microfones s é um múltiplo interior de π , em que para $m=1,2,3\dots$, tal como: $ks=m\pi$. Lembrando que $k=\omega/c$, logo a eq. (122) pode ser reescrita em função da frequência de excitação f , em que:

$$s < c/2f \quad (123)$$

5.3.3 Medições nas faixas de frequências 100-1600 Hz

As medições nas frequências de 100-1600Hz foram feitas com as amostras com a camada de espuma voltadas para a fonte sonora; entretanto, foi observado que os resultados apresentavam vários picos nos gráficos, sendo um fator característico de vibração causada por ressonância e antirressonância nos poros da espuma. Para ter o controle da vibração causada pela ressonância nos poros, foi usado o método de Olny e Panneton, (2008); T. lwase *et al.* (1980); (Olny *et al.* (2002) que utilizaram alfinetes em suas amostras para o controle da vibração.

O método consiste em estabilizar as amostras porosas, permitindo resultados mais assertivos (Panneton, Pilon e Sgard, 2003). Com isso, antes que fossem realizadas as medições definitivas no tubo de impedância, foram feitos vários testes para avaliar qual seria o aparato mais indicado para aplicar o método de Panneton *et al.* (2003). No experimento, foram testados os alfinetes de diâmetro 0,65mm e comprimento 29 mm e diâmetro de 0,90 mm e comprimento de 32 mm, conforme indica o fabricante.

A Figura 65 ilustra a embalagem dos alfinetes utilizados, n°s 29 e 32. Com o teste dos alfinetes nas amostras, foi verificado que as dimensões apresentaram as características ideais para o controle da vibração. O uso de dois tipos de alfinetes se deu pela disponibilidade de material. Os diâmetro e comprimento diferentes (nas caixas de n°s 29 e 32) não causou impactos nas medições; contudo os alfinetes n° 32 adaptaram-se melhor com as amostras de fibra de cana-de-açúcar por serem mais resistentes.

Foram feitos vários testes para definir a quantidade exata de alfinetes neste experimento. Foram feitos testes com a quantidades de 15, 20, 30, 40, 50 e 60 alfinetes; O teste com 40 alfinetes foi o que apresentou os melhores resultados no controle da vibração. As amostras

medidas com alfinetes abaixo de 40 unidades (15,20,30) não contribuíram para estabilizar a parte porosa, persistindo a ressonância em todas as medições.

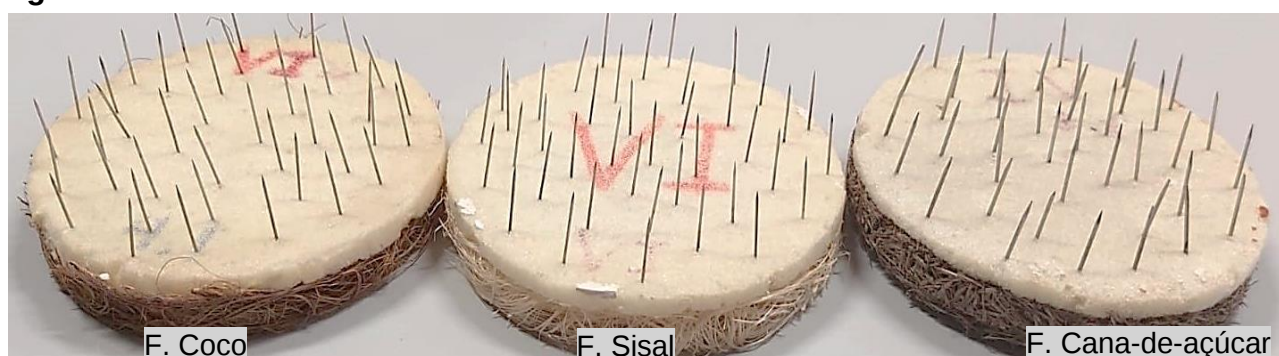
Figura 65: Caixas dos alfinetes utilizados para controle da vibração e da ressonância



Fonte: A autora, 2024.

O teste com uma quantidade de alfinetes acima de 40 (60 e 90 alfinetes) afetou negativamente os resultados, deixando as amostras mais rígidas e consequentemente comprimindo e/ou fechando os poros. Os melhores resultados foram obtidos com as quantidades de 40 alfinetes em cada amostra, o que foi ideal para o controle da vibração e ressonância. Com isso, as amostras receberam os alfinetes atravessando a parte fibrosa e, em seguida, a parte espumosa, permitindo a face da amostra espumosa ficar com os alfinetes de frente para a fonte sonora. A Figura 66 demonstra as amostras com camada de fibra natural na parte inferior e uma camada de espuma de PUCA (espuma de poliuretano de poliálcool de cana de açúcar) na parte superior, com os 40 alfinetes atravessando ambas as camadas:

Figura 66: Amostras com 40 alfinetes cada unidade

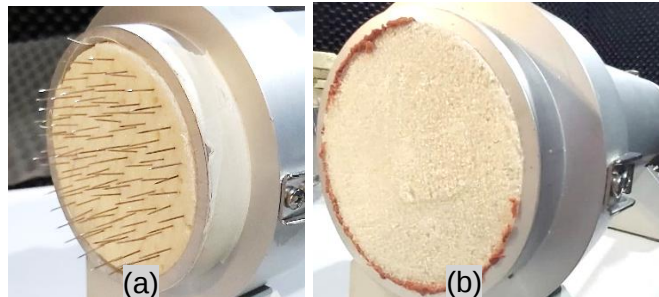


Fonte: A autora, 2024.

Outro fator necessário para ser testado foi o uso de plasticina (massa de modelar) nas bordas das amostras na tentativa de obter resultados mais estáveis. Conforme indica Pilon *et al.* 2004). A Figura 67 exibe duas imagens com as amostras colocadas no tubo de

impedância, sendo a Figura 67 (a) com alfinetes e sem a plasticina e a Figura 67 (b) amostra com plasticina nas bordas. Nas medições, todas as amostras que necessitaram de plasticina foram preenchidas na borda quando colocadas no tubo.

Figura 67: Imagem (a) com alfinetes e imagem (b) sem alfinetes e com plasticina na borda



Fonte: A autora, 2024.

5.3.4 Medições nas faixas de frequências 400-6400 Hz

As medições nas frequências de 400-6400 Hz foram feitas no tubo de impedância com diâmetro de 28 mm. As amostras usadas nesta medição foram as mesmas usadas nos métodos anteriores; entretanto, houve a necessidade de cortá-las no diâmetro exato do tubo. No método, foram medidas trinta amostras, sendo dez de cada tipo de fibra natural, tais como: amostra de fibra de coco+PUCA; fibra de sisal+ PUCA; fibra de cana-de-açúcar+PUCA da esquerda para direita conforme a Figura 68 que exhibe as amostras em vista superior.

Figura 68: Amostras de Ø 28 mm com uma camada de fibra natural e outra de espuma

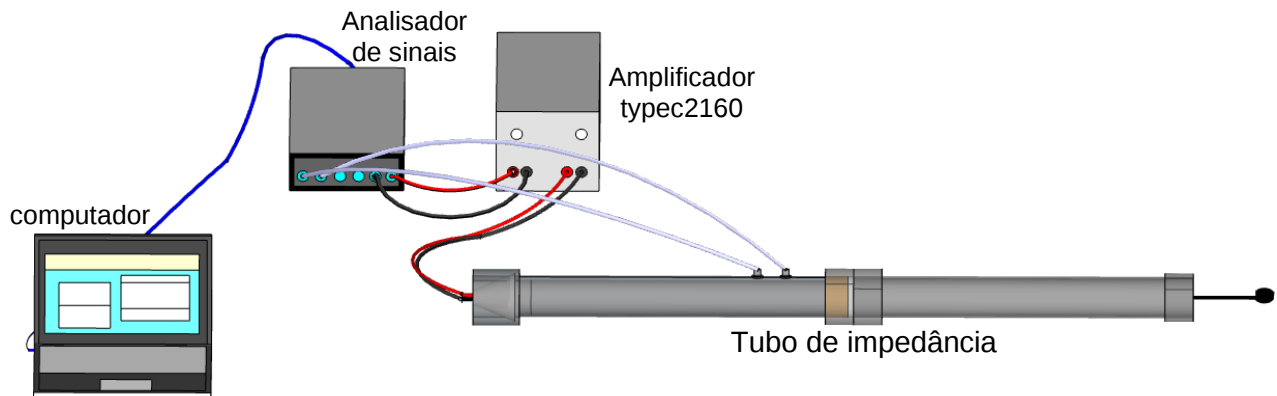


Fonte: A autora, 2024.

O método de medição e os equipamentos que compõem a bancada são os mesmos das medições em tubo de impedância de diâmetro 100 mm, agora com diâmetro de 28 mm. Além

disso, houve a necessidade de conectar um amplificador bruel typec2160 no tubo de impedância e no analisador de sinais, tal como o esquema ilustrativo da bancada na Figura 69. Todos os equipamentos usados fazem parte do Laboratório de Dinâmica e Mecanismos do Curso de Pós-Graduação da Pontifícia Universidade Católica Do Paraná.

Figura 69: Bancada de medição em tubo de impedância para frequência de 400 a 6400 Hz

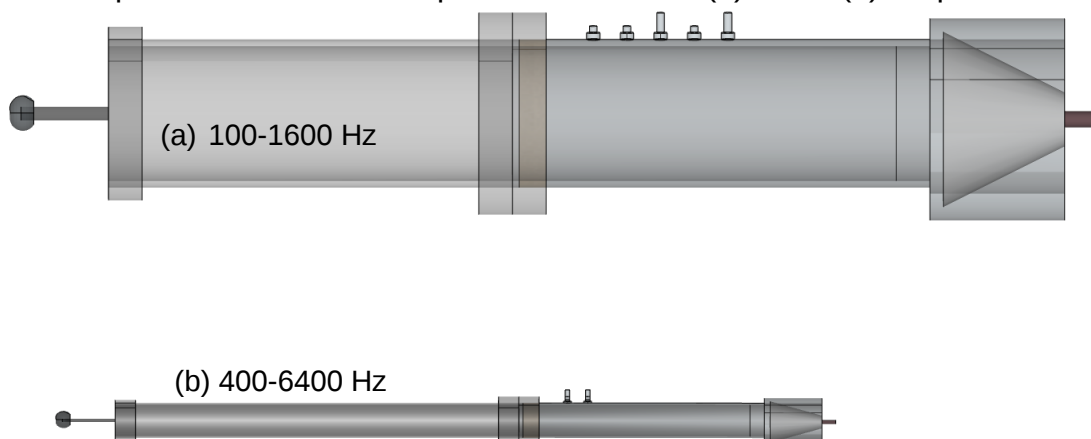


Fonte: A autora, 2024.

É fundamental mencionar, sobre os espaços entre os microfones usados em ambas as medições em tubo de impedância, que os estudos de Seybert e Soenarko (1981) e (Soenarko e Seybert, (2000) comprovaram que erros sistemáticos são reduzidos quando microfones são posicionados próximos das amostras, conforme as Figuras 63 - 64.

A Figura 70 exibe os dois esquemas em 3D dos tubos usados nos experimentos, em (a) o tubo de impedância para frequência de 100-1600 Hz e em (b) o tubo de impedância para frequência de 400-6000 Hz.

Figura 70: Esquema dos tubos de impedância de baixa (a) e alta (b) frequência



Fonte: A autora, 2024.

Os erros aleatórios são minimizados quando há alta coerência entre os sinais adquiridos pelos dois microfones; o aumento da coerência ocorre quando há diminuição do espaçamento entre os microfones. Entretanto, a menor distância entre os microfones pode reduzir a precisão das medições em baixas frequências. Isso se deve a erros que ocorrem quando $k_s \rightarrow 0$ ou $k_s \rightarrow \pi$. Um outro fenômeno do experimento importante a ser mencionado é que pode ocorrer baixa coerência quando um microfone está localizado em um ponto nodal do campo sonoro (Ver e Beranek, (2006). Para calcular a densidade de auto espectral ou espectro de potência, $G_{12}(f)$, do microfone 2 é necessário usar a eq. (124).

$$\gamma_{12}^2 = |G_{12}|^2 / G_{11}G_{22} \quad (124)$$

Para garantir a precisão dos resultados das medições das propriedades acústicas, estudos feitos em 1986 por Bodén & Abom (Bodén, Åbom e Bod, 1998) verificaram que os espaçamentos entre os microfones de acordo com as seguintes faixas de frequência são melhores nas faixas de $0,1\pi < k_s < 0,8\pi$. Com isso, é possível calcular as frequências mínima (f_{min}) e máxima ($f_{máx}$) de utilização do tubo de impedância, sendo obtidas de acordo com o número de onda k_c , nas equações apresentadas em (106) e (107) e a frequência de corte na eq. (108).

Com isso, conforme a (Tabela 13), tem-se para estas medições, os seguintes resultados considerando a frequências máxima, mínima e frequência de corte na temperatura aproximada de 20°C e velocidade do som no ar de 343m/s:

Tabela 13: Frequências máxima, mínima e de corte dos tubos de medições

Frequências	Frequências em Tubo de impedância de Ø 100mm	Frequências em Tubo de impedância de Ø 28mm
	[Hz]	[Hz]
$f_{máx}$	1372,0	4900,0
f_{min}	171,5	612,5
f_c	2008,91	7174,70

Fonte: A autora, 2024.

5.3.5 Método do fio quente

Os engenheiros de materiais reconhecem facilmente que a condução de calor nos sólidos é fundamental para entender e controlar muitos processos (Carslaw e Jaeger, 2016). Existem importantes aplicações que demandam a estimativa de calor, e, na acústica, esse parâmetro influencia principalmente nas medições que envolvam variação de pressão, tal como o método de Porosidade de Champoux (Champoux, Stinson e Daigle, 1990).

O método fio quente é um método simples que é comumente utilizado para determinar a condutividade térmica de materiais porosos, granulados e líquidos em geral (Santos, 2002). Segundo a norma ISO 8894-2 (2006) a técnica do fio quente é um procedimento de medição com base no aumento da temperatura, sendo inversamente proporcional ao tempo em um determinado local e a uma fonte de calor linearmente embutida em um corpo de prova. Nesta tese, esse método foi utilizado para avaliar termicamente apenas a fibra da cana-de-açúcar, por ser fibra de tamanho inferior (1-5 mm) ao tamanho das fibras de coco e sisal. Com isso, este método vem para viabilizar ambas as funções, térmica e acústica da fibra. A equação de difusividade do calor, equação de Fourier, foi utilizada para determinar as propriedades térmicas do insumo estudado, porque descreve o aquecimento do material em função da energia cedida pelo fio devido ao efeito Joule, eq. (125).

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (125)$$

Em que T é a temperatura [$^{\circ}\text{C}$], t o tempo [s], α a difusividade de calor material [m^2/s], r a distância que radia em relação ao fio aquecido [m]. As equações (126), (127) e (128) indicam as condições de contorno aplicadas na solução do problema descrita conforme demonstrado na eq. (125).

$$\Delta T(r,t) = 0 \quad (t \leq 0, \quad 0 \leq r \leq R) \quad (126)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -\frac{q}{2\pi\omega} \quad (r = 0, t \geq 0) \quad (127)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \Delta T(r \rightarrow \infty, t) = 0 \quad (r \rightarrow \infty, t \geq 0) \quad (128)$$

Sendo ΔT o aumento da temperatura no fio condutor em $^{\circ}\text{C}$, ω a condutividade térmica em $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, q a constante de fluxo de calor liberado pelo fio quente em W .

A primeira condição de contorno estabelece que tanto o fio quanto a amostra no instante inicial do experimento devem estar em equilíbrio térmico com o meio externo. A segunda

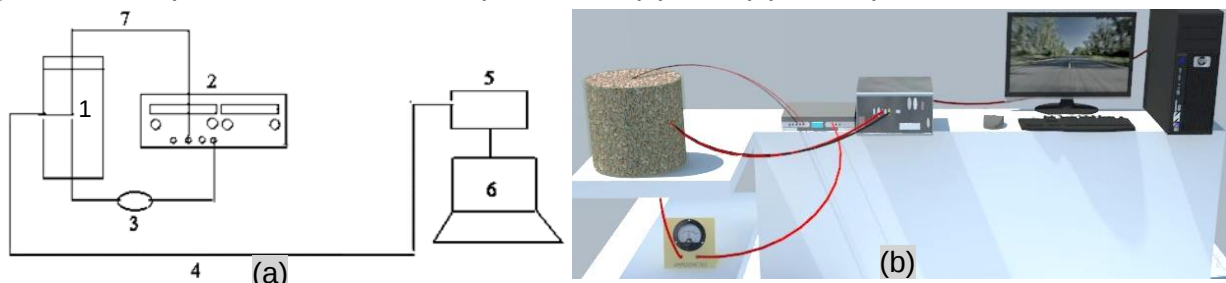
condição estabelece que o fluxo de calor gerado pelo fio é absorvido integralmente pela amostra, além do que este estabelece que a dimensão da espessura do próprio fio é desprezível em relação ao diâmetro do porta-amostra. A terceira condição afirma que a superfície externa da amostra está em equilíbrio térmico, com o meio externo, e que a sua temperatura não varia ao longo de todo experimento. A eq. (129) representa a solução da eq. (125), em conjunto com a aplicação das condições de contorno, demonstrada nas equações (126),(127) e (128); assim sendo:

$$T(t) - T(0)|_{(r=0,t)} = T(t) - T(0) = \frac{q}{4\pi\omega} \ln(t) \quad (129)$$

A técnica utilizada consiste em preencher um porta-amostra cilindro de acrílico vazado e preenchido com fibra de cana-de-açúcar, em um ambiente com umidade controlada. No centro do porta-amostra devidamente repleto por fibra, há um fio de resistência elétrica de Níquel-Cromo ligado a uma fonte de tensão CC de 1V.

A aquisição de dados obtida pelo amperímetro, voltímetro, e um termopar soldado no fio de resistência elétrica é indicada no computador. Para este experimento em particular, o fio de resistência possui 24.5 cm de comprimento. A placa de aquisição de dados apresenta a evolução da temperatura com o tempo correspondente ao fio de resistência que está em contato e em equilíbrio térmico com a amostra e seu entorno. O aquecimento do fio de Ni Cr ocorre com efeito Joule e o calor gerado é difundido através da fibra. A Figura 71 apresenta um esquema do sistema de medição e a bancada que foi montada no Laboratório de Dinâmica e no Laboratório de Sistemas Térmicos da PUC-PR.

Figura 71: Esquema do método fio quente em (a), em (b) a maquete da bancada



- 1- Aparato com fibra de cana-de-açúcar; 2- Fonte de alimentação-DC; 3- Amperímetro; 4- Termopar; 5- Analisador e gerador de dados; 6- CPU; 7- Fio de resistência de Níquel-cromo.

Fonte: A autora, 2024.

5.3.6 Método da granulometria por peneiramento

O método da granulometria usado comumente para analisar os tamanhos e quantidades de partículas mais frequentes em uma dada porção de grãos utiliza um critério de análise por peneiramento com aberturas da malha quadrada para determinar a gradação do solo (ASTM D6913M-17 (ASTM, 2010)). Este método foi usado por Giuseppe (Giuseppe, Di *et al.*, 2016) para caracterizar as fibras da lignocelulósicas de cânhamo e miscanthus; contudo, o autor otimizou fazendo uso da granulometria por raio X, analisando as propriedades mecânicas e suas dimensões.

O método da granulometria foi utilizado nesta tese para medir apenas as fibras de cana-de-açúcar, por serem fibras achatadas e de tamanho menor, variando de 1-5 mm, enquanto as amostras de fibra de coco e sisal apresentaram tamanhos maiores (50-600 mm). Caso as fibras de coco e sisal fossem cortadas nas dimensões da fibra de cana-de-açúcar, passariam facilmente pela malha por serem cilíndricas; além disso, essas fibras não atingem estrutura, em pequenas quantidades, quando estão em tamanhos menores para formação das amostras. A granulometria leva em conta a possibilidade de compreender que grãos muito pequenos podem comprometer as amostras porosas, pois, ao aumentar a quantidade de grãos muito pequenos, há a diminuição dos interstícios ou poros que serão preenchidos por esses grãos.

Para dar início ao ensaio, foi necessário livrar a amostra de qualquer resíduo de umidade; para isso, a fibra permaneceu 5 horas em uma estufa com temperatura de aproximadamente 40 graus; após isso, as fibras passaram por 4 peneiras com aberturas de: 4,75 mm; 1,19 mm; 4,25 mm/μm; 75 mm/μm. O peneiramento foi executado em temperatura ambiente de aproximadamente 25 graus. A Figura 72 ilustra as peneiras usadas no peneiramento. As fibras passaram facilmente pela peneira 1, enquanto que a peneira 2 depositou uma quantidade média de fibra maiores, enquanto que a peneira 3 acumulou mais fibras e quase não passaram fibras para peneira 4.

Figura 72: Peneiras de dimensões distintas das malhas



Fonte: A autora, 2024.

A passagem das fibras pelas peneiras evidencia que, quanto maior a quantidade grãos menores, mais densa será a amostra, e por vezes, menos porosa. Logo, para amostras de fibras menores é necessário um tamanho médio de 4,5 mm por fibra; assim haverá interstício entre as fibras.

5.3.7 Análise do ciclo de vida energético das amostras

A conscientização quanto aos impactos dos recursos descartados no meio ambiente e da importância da preservação ambiental tem estabelecido interesse no desenvolvimento de técnicas para um consumo mais consciente, com o propósito de mitigar a poluição ambiental através de reciclagem ou, pelo entendimento do ciclo de vida do material, possibilitar a produção de peças com início, meio e fim da sua vida útil.

A ONU estabelece no objetivo 12 dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (Objetivo 12 Consumo e produção responsáveis) que:

focado na promoção de recursos e eficiência energética, infraestrutura sustentável e acesso a serviços básicos e empregos “verdes”, esta meta conversa diretamente com a indústria de construção civil. **Ela tem um papel importante na prevenção de resíduos por meio da redução, reciclagem e reutilização** – princípios de “economia circular”, em que os recursos não são desperdiçados.

A importância de pensar a destinação do material após o seu uso é crucial para atender o objetivo 12 dos 17 objetivos da ONU. Além disso, buscar uma matriz para fabricação com resíduos da agricultura fortalece um dos princípios da economia circular, “[...] em que os recursos não são desperdiçados.”.

Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção civil e Demolição (EBRACON), na Europa há desperdício equivalente a 200 milhões de toneladas anuais de concreto, pedras e recursos minerais valiosos. Tal volume de materiais seria suficiente para se construir uma rodovia com seis faixas de rolamento interligando as cidades de Roma, na Itália, a Londres, na Inglaterra. No Brasil, essa cultura de consumo e desperdício é alta; além disso, não usar agregado reciclado desanima o cenário da reciclagem.

A cultura do reaproveitamento do refugo da construção civil ainda é baixo, como por exemplo as espumas sintéticas usadas em tratamento acústico. Estas passam por um estágio longo de mecanização para a sua fabricação, com alto consumo de energia embutida

e emissão de gases. Quando esse material passa por reciclagem, o processamento é similar a produção de origem; a geração de espuma sintética reciclada produz alto consumo de energia, água e gases poluentes para obter um produto final que geralmente terá outras funcionalidades, como exemplo colchão ou tapete (ABRIPUR, 2020).

Estima-se que, no Brasil, cada peça usada, cada revestimento, cada acabamento, cada piso colocado em uma obra é responsável por 50% dos recursos naturais e 40% de insumos energéticos de todas as fontes na sua produção (Tavares, 2006b). Material acústico fabricado a partir da fibra da cana-de-açúcar tem baixo custo, baixo consumo de energia embutida na geração e baixa emissão de gases poluentes. Além disso, a geração de matéria prima é quase toda autossuficiente e sua decomposição é garantida quando exposta às condições externas.

Para o cálculo da Análise do Ciclo de Vida Energético ACVE ou CVE das amostras, foi necessário seguir todas as etapas de fabricação das amostras de fibras naturais e das espumas separadamente. Com isso, foi necessário elaborar dois inventários, sendo uma das amostras de fibras e outro da parte espumosa de PUCA. Os dados de entrada e saída de todos os processos de produção foram coletados conforme indicado na ISO 14044 (ISO, 2006), no método de Treloar (Fay, Treloar e Iyer-Raniga, 2000b) e Tavares (Tavares, 2006b). É crucial equacionar e compilar os dados de entrada e saída de energia embutida em todo processamento das amostras fibrosas e espumosas. Esses dados vêm desde a colheita da gramínea à fase adulta, dos processamentos e retirada dos seus insumos na usina até a geração das amostras em laboratório.

O ciclo de vida energético de qualquer objeto deve passar por equações que obedecem às seguintes etapas: pré-operacional; operacional e pós - operacional. Para as amostras desta tese, as etapas feitas foram a pré-operacional e a operacional (eq. 130), conforme Treloar (Fay, Treloar e Iyer-Raniga, 2000b). A etapa pós operacional não foi avaliada por considerar que o ciclo médio de uma fibra natural em condições externas é de no máximo 2 anos (Ramos *et al.*, 2016). O ciclo de vida energético é calculado como:

$$CVE = EE_i + (E_{erec} + EO) * tv \quad (130)$$

Em que EE_i é a energia embutida inicial da construção, E_{erec} a energia incorporada recorrente no ano (manutenção do material), EO a energia operacional anual (*Incluindo condicionamento de espaço e outras energias domésticas usados) e tv o tempo de vida da amostra. Em que E_{erec} e E_{eop} são calculados conforme as equações (131) e (132).

$$E_{\text{rec}} = E_{\text{emat}} + E_{\text{tr.mat}} + E_{\text{tr.trab}} + E_{\text{desp}} + E_{\text{tr.desp}} \quad (131)$$

$$E_{\text{eop}} = E_{\text{equip}} + E_{\text{rep.}} + E_{\text{desp.rep}} + E_{\text{tr.rep}} \quad (132)$$

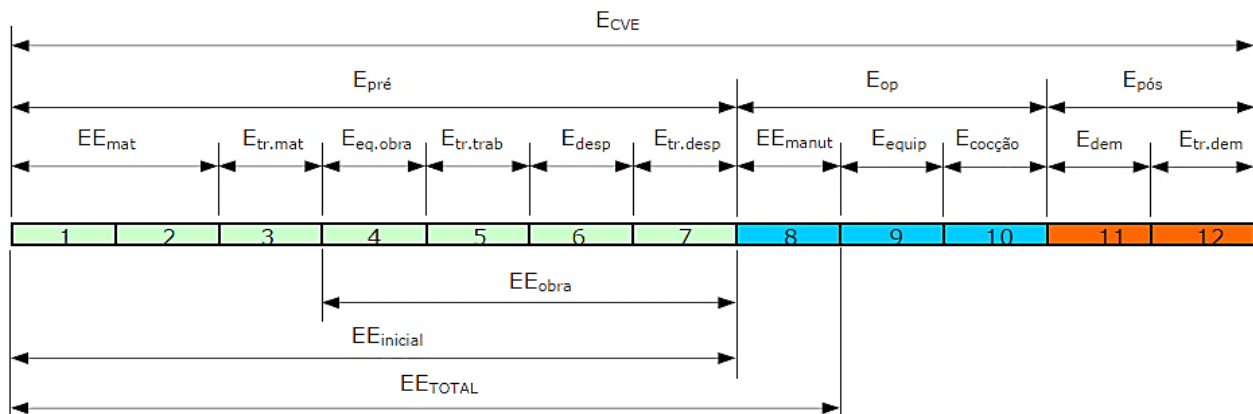
Sendo E_{emat} a energia embutida do material, $E_{\text{tr.mat}}$ a energia do transporte do material, $E_{\text{tr.trab}}$ energia do transporte do funcionário à obra, E_{desp} energia de desperdício de materiais, $E_{\text{tr.desp}}$ energia do transporte de desperdício, E_{equip} energia embutida do equipamento, E_{rep} energia embutida de reposição, $E_{\text{desp.rep}}$ energia de desperdício de reposição e $E_{\text{tr.rep}}$ energia do transporte de reposição. Para calcular a Energia Embutida inicial (EE_i) foi utilizada a técnica de *IO analysis Options* e Brown (1996), sendo:

$$EE_i = \sum_{e=1}^E D_{en} \times Ta \quad (133)$$

Em que en é a intensidade de energia direta do setor alvo n , E é o número de energia que abastece os setores e D_{en} é a entrada direta de energia de cada setor de fornecimento do objeto analisado n e Ta a tarifa média nacional de energia. A norma ISO 14044 orienta as etapas e fases para viabilizar o levantamento e os cálculos de consumo energético de qualquer produção.

A Figura 73 orienta as etapas que devem ser seguidas para análise do ciclo de vida; entretanto, nesse caso, trata-se de uma análise de ciclo de vida energético de uma edificação. Embora seja uma análise exclusiva para edificação, essa organização desempenha uma função para qualquer produção.

Figura 73: Esquema do ciclo de vida de energético de uma construção



Fonte: Tavares, 2004.

Análise do Ciclo de Vida Energético ACVE das fibras e PUCA

Para equacionar toda a energia embutida (água, energia e combustível) usada no processo de produção das fibras e na confecção das amostras, foi simplificada, nesta tese, a ACVE das amostras produzidas para absorção acústica. O estudo foi efetuado para conscientizar sobre uma pequena parcela dos problemas que a sociedade enfrenta atualmente das mudanças climáticas. Quando se tem conhecimento da produção de um produto, ficam mais claros os impactos que ele pode gerar quando descartado.

ACVE Fibra da casca do Coco

Conforme Lorena Tolomelli (blog Universidade Online de Viçosa, 2019), a extração da fibra do coco se dá com a colheita de 11 a 12 meses quando destinado à indústria e intervalo de colheita de 25 meses aproximadamente, tempo necessário para o surgimento de novos frutos. Em regiões de condições climáticas não ideais, o intervalo de colheitas são mais maiores, sobretudo em épocas mais frias. Para extração do fruto, o processo ainda se dá de maneira simples, com baixa tecnologia, sendo uma das principais ferramentas o uso de facão e escada nas palmeiras maiores. Mesmo que seja mais econômico obter os frutos já maduros que caem ao chão, a colheita trimestral é mais comum, pois potencializa os lucros e ameniza os possíveis roubos. As imagens a seguir (Figura 74) mostram o fruto com casca em (a) e a fibra extraída da casca do coco em (b).

Figura 74: Em (a), o fruto do coco; em (b), a fibra da casca do coco



Fonte: (a) GazetadoRio; (b) A autora, 2024.

Consumo de água

Para a obtenção da fibra de coco, é necessário que seja feita uma lavagem de proporção 1:1; logo, para uma quantidade de 4,04 kg de fibra de coco (quantidade usada para produção das amostras) tem-se o uso de 4,04 litros de água.

Consumo de energia elétrica

As empresas ou usinas que manejam a extração da fibra do coco da casca, geralmente, usam tecnologia de ponta; contudo, não foram encontrados dados do consumo de energia na produção da fibra de coco usada nesta tese.

Consumo energético do transporte

A fibra usada no laboratório foi produzida/processada na fábrica Coquim-Ouro fértil, sendo oriunda de Vila dos Palmares (SP). Para que a fibra chegasse no Laboratório de Mecanismos da PUC-PR em Curitiba (PR), a fibra percorreu 430 km de distância desde a Vila dos Palmares (SP). Em horas de viagem, com transporte particular, o tempo gasto foi de aproximadamente de 6h30min. Para um percurso mais longo, com transporte de carroceria maior, o percurso recomendado é o mais longo, com distância de 506 km e o tempo estimado de viagem de aproximadamente de 8h30min.

ACVE Fibra do Sisal

A fibra do sisal, extraída da planta sucultenta *Agave Sisalana*, que, conforme afirma o Blog Cotese, a planta é encontrada nas regiões semiáridas do Nordeste brasileiro. A fibra extraída dessa sucultenta é utilizada em diversas aplicações; contudo, o seu principal emprego ainda se dá na indústria de fios, cordas e mantas. Um outro papel fundamental da agave é a proteção ao meio ambiente que ela oferece quando usada a sua fibra no desenvolvimento de peças. A fibra de sisal, uma fibra biodegradável, pode substituir plásticos e derivados do petróleo em peças de destinação semelhantes. A Figura 75 expõe a planta e a fibra extraída de forma mecânica.

Figura 75: Em (a), a planta sucultenta *Agave Sisalana*. Em (b), a fibra do sisal extraída por maquinário



Fontes: (a) Joe Pilié, (b) Sisal Sul, 2024.

Consumo de água

Para a produção da fibra de sisal, a medida de água se torna mais necessária. Conforme a Embrapa (Suinaga *et al.*, (2021), a fibra do sisal deve ser mergulhada na água, permanecer entre 8 a 12h para retirar todo resíduo da mucilagem péctica e da seiva clorofílica que ficam aderidos na fibra. A quantidade inicial de água para limpeza do sisal depende do método usado em cada indústria agrícola, como por exemplo o método da maceração que exige um consumo alto de água. Com a maceração, para cada quilo de fibra de sisal, são usados aproximadamente 20-30 litros de água para limpeza de todos resíduos e mucilagem (Khan *et al.*, (2023); (Santos, (2011).

Para a produção das amostras feitas a partir da fibra de sisal, levando em consideração que a fibra já passou por todo o processamento e extração de insumos, a água usada na manufatura das amostras a partir de 2,15kg de fibra, tanto nas amostras efetivas para os experimentos quanto aos excedentes/residuais, foi de 43 litros. O cálculo foi realizado com base no método de maceração, considerando a metade do valor usado no método (tendo como base a metade de 20 litros), pois, na produção das amostras, a água tem maior participação na limpeza pós manufatura. Logo, 10 litros de água para 2,15 kg, considerando a fibra multiplicada pelo valor em litros, resultando em 21,50 litros de água.

Consumo de energia elétrica

Não foram encontrados dados sobre o uso energético da produção da fibra.

Consumo energético do transporte

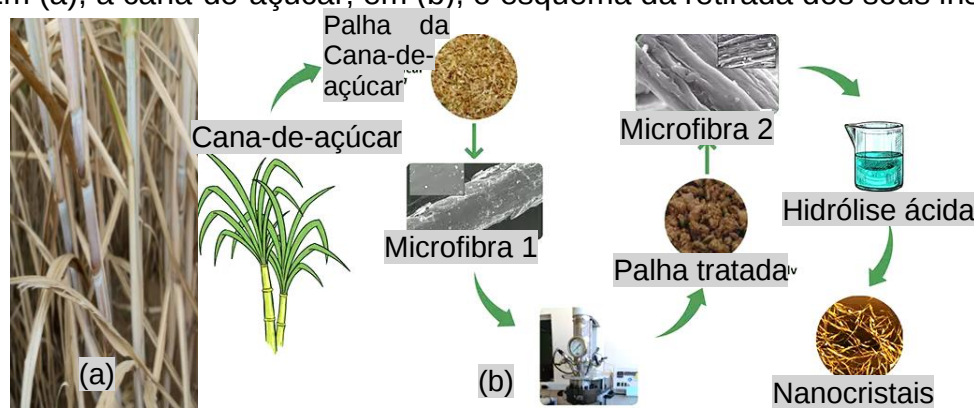
A fibra de sisal usada no laboratório para fabricação das amostras é oriunda da Sisal Sul, localizada em São Paulo, Rua da Cantareira. Simulando o percurso por meio de veículo particular, a distância é de aproximadamente de 447 km com 6h5min de viagem pelo trajeto mais curto. Para um percurso mais longo, com veículos de carroceria maior, o trajeto indicado fica em torno de 490 km, com 7h55min de viagem até o Laboratório de Mecanismos da PUC-PR.

ACVE Fibra do bagaço da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é abundante em território nacional e faz parte de uma matriz que compõe vários alimentos e produtos. Conforme Alimentus-UFRGS informa, a cana-de-

açúcar, além de gerar o melado, o álcool, o combustível, o açúcar e a aguardente, gera vários outros produtos derivados do bagaço, derivados do melado, cosméticos e outros, além do uso dos resíduos dos próprios produtos fabricados de sua matriz. A fibra da cana possui várias serventias e, muitas vezes, quando excede a quantidade de fibra na produção, na usina de produção a fibra se torna resíduo da agricultura. Nas imagens da Figura 76 (a), a gramínea cana-de-açúcar pronta para o consumo e processamento e, na Figura 76 (b), as fases mais simples da cana-de-açúcar para seu processamento com finalidade de retirar alguns insumos.

Figura 76: Em (a), a cana-de-açúcar; em (b), o esquema da retirada dos seus insumos



Fonte: (a) (Rossetto e Santiago, 2022); (b) (Embrapa Instrumentação, 2021).

Consumo de água

Para extrair todos os insumos da cana-de-açúcar através da água e gerar o bagaço, de acordo com os dados do relatório do fornecedor, o consumo é significativamente alto. Para uma safra (12 a 18 meses), cada tonelada de cana-de-açúcar gera o consumo de 2.497,94 litros de água. Considerando que a fibra pronta para produção das amostras já passou por todos os procedimentos de desidratação, a produção das amostras desta fibra exige pouca água, sendo usada em maior quantidade na limpeza pós manufatura. Com isso, a quantidade de água ideal para 2,59 kg de fibra de cana-de-açúcar destinada às amostras se dá multiplicando a quantidade em litros pela quantidade usada, logo tem-se 2,45 litros de água.

Consumo de energia elétrica

O plantio da cana-de-açúcar destinada a geração do açúcar, do álcool, combustível e derivados permite uma produção com autossuficiência em usina, pois a energia elétrica consumida e gerada vem da biomassa da cana, por meio da combustão de bagaço em

caldeiras. Segundo os dados do Relatório de Sustentabilidade da Usina Alto Alegre (USINA ALTO ALEGRE, 2017), a energia utilizada pelas caldeiras é de 626.692 MWh e o uso do solo nas operações em 2017 foi de 128.308 ha, considerando a área total ocupada para a colheita. Conforme os dados da usina, é possível cultivar e entregar para processamento uma quantidade aproximada de 9.631.578 ton. de cana-de-açúcar. Esta quantidade de cana, gera uma produção de 19.114.718 ton. de açúcar, 213.074 m³ de álcool e 626.692 MWh de energia elétrica. Além disso, os gases gerados na cadeia de produção normalmente são NO_x (1.530,348 to t) e SO_x(1.100,977 t) (dados de 2017/2018, ano em que a fibra foi fornecida para elaboração das amostras).

Consumo energético do transporte

As fibras de cana-de-açúcar trazidas em veículo particular da Usina Alto Alegre percorreram 511km e aproximadamente 7h07min de Santo Inácio/SP até o Laboratório de Mecanismos da PUC-PR, em um percurso mais longo. Em trajeto mais curto, a distância fica em média de 524km com tempo de viagem de 7h30min.

Espuma de PUCA

A espuma feita a partir de isocianato e poliol de cana-de-açúcar PUCA possui a vantagem de ser aplicável em várias destinações, conforme o manual do fornecedor que especifica o uso da espuma. Segundo o fornecedor, a espuma a base de poliol de cana-de-açúcar é um sistema de espuma rígida de poliuretano apropriado para diversas aplicações, como material isolante térmico, bem como elemento de estruturação e flutuação. Além disso, a espuma possui propriedades isolantes, podendo ser utilizada na fabricação de refrigeradores, câmaras frigoríficas, painéis, caminhões frigoríficos, telhas, entre diversas outras aplicações. A Figura 77 mostra um teste do bicomposto já no formato da amostra de 100 mm.

Figura 77: Teste com a espuma PUCA (isocianato e polioli)



Fonte: A autora, 2024.

Consumo de água

Não há consumo de água para fabricação da amostra.

Consumo de energia elétrica

Não foram encontrados dados. O consumo de energia para extração de isocianato é alto, pois trata-se de um derivado do petróleo; logo, a análise é mais complexa por ter que considerar todas as etapas até a produção do isocianato. A produção do polioli de cana-de-açúcar envolve outros processos que são de ordem química; contudo, não se deve descartar o uso de energia.

Consumo energético do transporte

O transporte da PUCA foi oriundo do fornecedor, localizada em São Paulo na Rua Primo Antonio Fanti; o menor trajeto até o Laboratório de Mecanismos da PUC-PR foi de 572 km com tempo médio de viagem de 8h30min, e o maior trajeto de 603km com o tempo de 8h48min.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Introdução

As propriedades acústicas dos materiais são frequentemente encontradas a partir de aferições laboratoriais com a execução de métodos padronizados. Através desses métodos, é possível assumir que uma amostra tem qualidades apropriadas para absorver o som. O coeficiente de absorção sonora de um material é uma propriedade que pode ser avaliada por vários métodos. Nesta tese, as 30 amostras de fibras naturais e PUCA (poliuretano de poliálcool de cana-de-açúcar), sendo, para cada tipo de fibra, 10 amostras com fibra (coco, sisal e cana-de-açúcar), foram analisadas, conforme:

- I. **Resistividade ao fluxo:** Para esse método, foram avaliadas as amostras de duplas camadas (fibra natural e PUCA), com diâmetro de 100 mm e espessura aproximada de 15 mm.
 - a) **Método experimental de Ingard e Dear (1985):** A medição da resistividade ao fluxo e a reatância dos materiais foi realizada através da interação do som com o material fibroso e poroso. O método dos autores envolveu dois microfones. Para esta tese, foram estudadas as teorias de Ingard e Dear (1985).
 - b) **Método experimental de Bies e Hansen (1988):** O método proposto é um aprimoramento do método de Ingard e Dear; contudo, os autores utilizaram três microfones, sendo dois nas proximidades da amostra e um na outra extremidade do tubo fechado. Para esta tese, foi aplicado o método experimental de Bies e Hansen (1988).
- II. **Função de Transferência nas faixas de frequências de 100-1600 e 400-6400 Hz:** Nesta análise, foram usados dois métodos em conformidade com a norma ASTM 1050-10 nas amostras de duplas camadas.

- a) **Faixa de frequência de 100-1600 Hz:** Para o experimento nas faixas de frequências de 100 à 1600 Hz, foi manuseado um tubo de impedância de diâmetro interno de 100 mm.
 - b) **Faixa de frequência de 400-6400 Hz:** Para o experimento nas faixas frequências de 400 à 6400Hz, foi manuseado um tubo de impedância com diâmetro interno de 28 mm.
- III. Métodos empíricos:** Os métodos empíricos foram analisados a partir das equações empíricas de Delany e Bazley (1970) e de Allard e Champoux (1991).
- IV. Propriedade Térmica da fibra de Cana-de-açúcar e avaliação do ciclo de vida energético das amostras:** O método do fio quente foi usado para avaliar as propriedades térmicas da fibra da cana-de-açúcar e a análise do ciclo de vida energético das amostras objetivou trazer informações de todo quantitativo de energia embutida gasta no seu processamento.

Adendo

As medições foram feitas com as amostras definidas como:

Espuma de polioliol de cana-de-açúcar como PUCA;

Camada de espuma de polioliol de cana-de-açúcar como PU;

Camada de fibra de coco com polioliol de cana-de-açúcar como PUCC;

Camada de fibra de sisal com polioliol de cana-de-açúcar como PUSS;

Camada de fibra de cana-de-açúcar com polioliol de cana-de-açúcar como PUCN.

6.1 RESISTIVIDADE AO FLUXO σ

Para iniciar o experimento de resistividade ao fluxo, as análises dos modelos matemáticos e métodos de Ingard e Dear (1985) e Bies e Hans (1988) foram aplicadas para determinar as características das amostras. A Tabela 14 aponta as espessuras e densidades das amostras, com seus respectivos indicativos de desvio padrão.

Tabela 14: Propriedade das amostras

Fibras/PUCA	Espessura [mm]	Densidade [kg/m ³]
Coco-PUCC	15,97 ± 1,30	83,7 ± 7,02
Sisal-PUSS	14,00 ± 1,05	98,87 ± 7,94
Cana-de-açúcar-PUCN	17,46 ± 0,73	119,68 ± 14,78

Fonte: A autora, 2024.

O comparativo da Tabela 14 apresenta as amostras de fibra de coco e de sisal com menor variação na densidade em relação às amostras de fibra de cana-de-açúcar. Contudo, as amostras de fibra de cana-de-açúcar se apresentam mais firmes devido as dimensões das fibras que variam de 2 a 5 mm. O tamanho menor e o formato achatado da fibra ajuda na firmeza da estrutura da amostra; contudo, são mais fáceis de desmanchar ao serem retiradas do molde. Cada medição de σ foi realizada com uma unidade de amostra de fibra/PU, sendo efetuada a incidência sonora na face espumosa da amostra.

O experimento consistiu em considerar P 1, P 2 e P 3 a pressão sonora em Pascal, sendo avaliada pelos microfones mic1, mic2 e mic3, respectivamente, com a densidade do ar de 1,184 kg/m³. A temperatura aferida foi a do dia/hora da medição, ocorrendo algumas alterações ao longo das horas. A velocidade de propagação do som foi calculada segundo a equação (104) ($c = \sqrt{\gamma R_i (273 + T)}$). Assim sendo, foi medida a resistividade ao fluxo σ com o método de Bies e Ransen (1988), (vide cap. 5, tópico 5.3.1), conforme a eq. (103), $R = \frac{\rho c}{l} 10^{(NPS_1 - NPS_3)/20}$, sendo estabelecida, para cada tipo de fibra/PUCA, a frequência de 155 Hz. A Tabela 15 apresenta o resultado do cálculo da parcela $\frac{\rho c}{l}$, sendo l a espessura da amostra em m, ρ a densidade do ar em kg/m³ e c a velocidade do som em m/s², com o método de resistividade ao fluxo de Bies e Hansen.

Tabela 15: Método de Bies e Hansen para cada amostra fibra/PUCA

Coco/PUCA -PUCC	$25648,40 \cdot 10^{(NPS1-NPS3)/20}$
Sisal/PUCA -PUSS	$29313,30 \cdot 10^{(NPS1-NPS3)/20}$
Cana-de-açúcar/PUCA -PUCN	$23454,70 \cdot 10^{(NPS1-NPS3)/20}$

Fonte: A autora, 2024.

6.1.1 Fibra de coco/PUCA - PUCC

A Tabela 16 demonstra os resultados das medições de resistividade ao fluxo das 10 amostras de dupla camada de fibra de coco e PUCA, amostras de PUCC, com a incidência sonora na parte espumosa da amostra, como já mencionado anteriormente. As espessuras das amostras sofreram alteração, devidas às características naturais das fibras que tendem a expandir-se com a umidade. Considerando c a velocidade do som em m/s, l a espessura da amostra em m e T temperatura em $^{\circ}C$.

Tabela 16: Medição de resistividade ao fluxo das amostras de PUCC

AMOSTRA COCO/PUCA	P 1 [Pa]	P 2 [Pa]	P 3 [Pa]	P1-P3 [Pa]	T [C°]	c [m/s]	l [m]	σ P1/P3 [Pa.s/m]
1	0,047	0,007	0,038	0,0086	25,4	346,26	0,0161	25536,90
2	0,052	0,015	0,036	0,0160	25,4	346,26	0,0142	29006,20
3	0,060	0,007	0,017	0,0431	25,4	346,26	0,0155	26581,37
4	0,047	0,012	0,029	0,0183	25,4	346,26	0,0165	24959,69
5	0,064	0,013	0,031	0,0324	25,4	346,26	0,0158	26028,08
6	0,064	0,016	0,013	0,0506	25,4	346,26	0,0138	29816,86
7	0,055	0,009	0,033	0,0216	25,4	346,26	0,0166	24728,80
8	0,058	0,007	0,026	0,0313	25,4	346,26	0,0183	22520,63
9	0,052	0,017	0,025	0,0263	25,4	346,26	0,0171	24104,05
10	0,065	0,005	0,020	0,0451	25,4	346,26	0,0159	25886,06

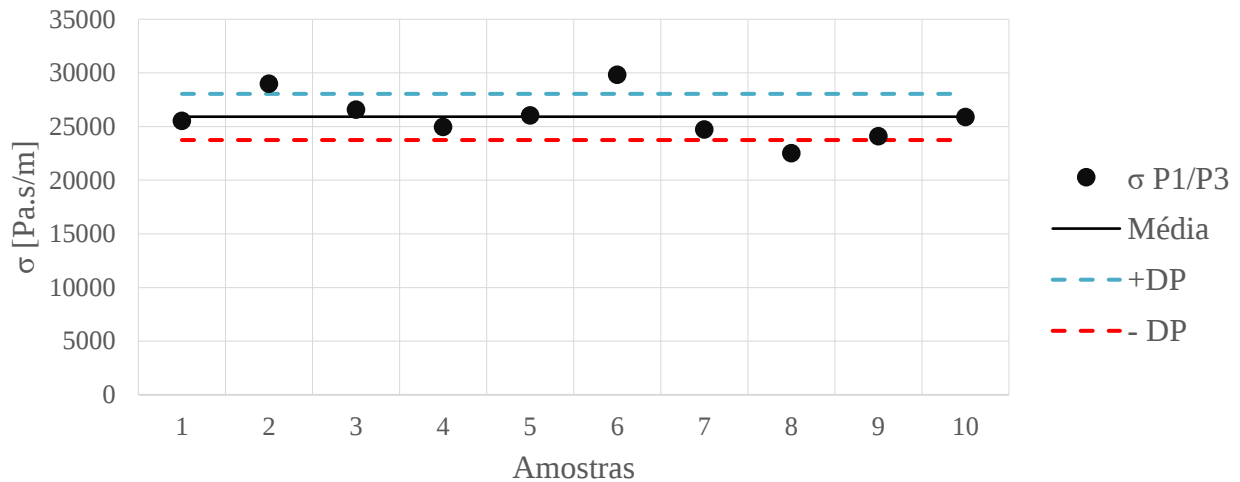
Fonte: A autora, 2024.

Considerando c a velocidade do som em m/s, l a espessura da amostra em m e T temperatura em $^{\circ}C$. Além disso, é importante analisar o calor específico da fibra do coco de $0,48 \text{ cal/g}^{\circ}C$, conforme os estudos de Simões *et al.* (2022) e Lopes (Lopes e Tannous, 2022) e a condutividade térmica de $0,054 \text{ W/m.K}$, conforme Alvarez *et al.* (2012).

Com os dados da Tabela 16, o gráfico foi gerado para identificar com clareza os resultados da resistividade ao fluxo. No Gráfico 2, os resultados da diferença de pressão entre os microfones, em cada medição, ficaram muito próximos; contudo, os valores de σ variaram entre as medições, de 22520,63 a 29816,86 Pa.s/m. As amostras 2 e 6

apresentaram maiores resistividades ao fluxo σ , operando acima da média, alcançando 29006,63 e 29816,86 Pa.s/m respectivamente. As amostras 8 e 9 obtiveram os menores valores de σ , ficando abaixo da média, apresentando resultados entre 22520,63 e 24104,05 Pa.s/m respectivamente. A média dessa medição correspondeu a 25918,47 Pa.s/m e o desvio padrão variou de 28048,21 a 23743,75 Pa.s/m.

Gráfico 2: Medição de resistividade ao fluxo das 10 amostras PUCC



Fonte: A autora, 2024.

6.1.2 Fibra de Sisal/PUCA - PUSS

As medições das amostras de PUSS alcançaram valores maiores que as amostras de PUCC, considerando que o maior valor de σ das amostras de PUCC foi de 22520,63 a 29816,86 Pa.m/s, enquanto que as amostras de PUSS obtiveram uma variação de 26507,30 a 32808,80 Pa.m/s.

Na Tabela 17 os dados analisados das 10 amostras de PUSS. Para as amostras de fibra de sisal PUSS, foi necessário considerar o calor específico de 0,48 cal/g°C, conforme os estudos de Teja *et al.* (2016). A condutividade térmica aferida foi de 0,043 W/m.K, tal como em Neira (Neira, 2005).

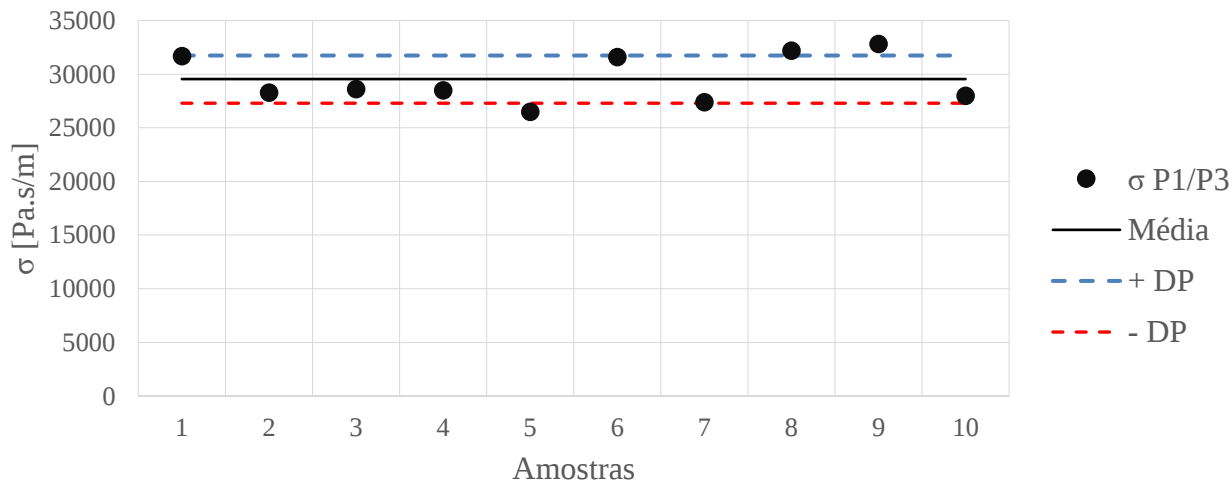
Tabela 17: Medição de resistividade ao fluxo das amostras de PUSS

AMOSTRA SISAL/PUCA	P 1 [Pa]	P 2 [Pa]	P 3 [Pa]	P1-P3 [Pa]	T [C°]	c [m/s]	l [m]	σ P1/P3 [Pa.s/m]
1	0,062	0,0062	0,0172	0,0451	26	346,61	0,0130	31676,10
2	0,062	0,0089	0,0202	0,0413	26	346,61	0,0146	28291,61
3	0,054	0,0195	0,0272	0,0266	26	346,61	0,0144	28617,21
4	0,052	0,0175	0,0279	0,0236	26	346,61	0,0144	28488,38
5	0,068	0,0037	0,0102	0,0580	26	346,61	0,0156	26507,30
6	0,057	0,0097	0,0305	0,0261	26	346,61	0,0130	31606,89
7	0,058	0,0144	0,0205	0,0372	26	346,61	0,0150	27393,97
8	0,065	0,0078	0,0127	0,0522	26	346,61	0,0128	32196,96
9	0,059	0,0091	0,0213	0,0376	26	346,61	0,0126	32808,80
10	0,053	0,0148	0,0299	0,0234	26	346,61	0,0147	28002,58

Fonte: A autora, 2024.

Com os dados aferidos apresentados na Tabela 17, o Gráfico 3 indica que as amostras 8 e 9 ficaram com maiores valores, sendo de 32196,96 e 32808,80 Pa.s/m respectivamente. As amostras 5 e 7 apresentaram valores menores, sendo 26507,30 e 27393,97 Pa.s/m respectivamente. A média desta medição apresentou 29541,17 Pa.s/m com desvio padrão variando entre 27291,87 a 31736,23 Pa.s/m.

Gráfico 3: Medição de resistividade ao fluxo das 10 amostras de PUSS



Fonte: A autora, 2024.

6.1.3 Fibra de cana-de-açúcar/PUCA - PUCN

As amostras avaliadas de PUCN apresentaram menores valores de resistividade ao fluxo em comparação com as amostras de PUCC e PUSS, com uma variação de resistividade ao

fluxo entre 21861,17 a 24983,99 Pa.s/m. Contudo, com menor desvio padrão em relação as medições anteriores.

Foram considerados os dados do calor específico da fibra da cana-de-açúcar de 0,43 cal/g°C, conforme os estudos de Phanindra *et al.*, (2014) e da condutividade térmica de 0,043 W/m.K em Cendon *et al.*, (2021). A Tabela 18 com as informações das medições das amostras de PUCN.

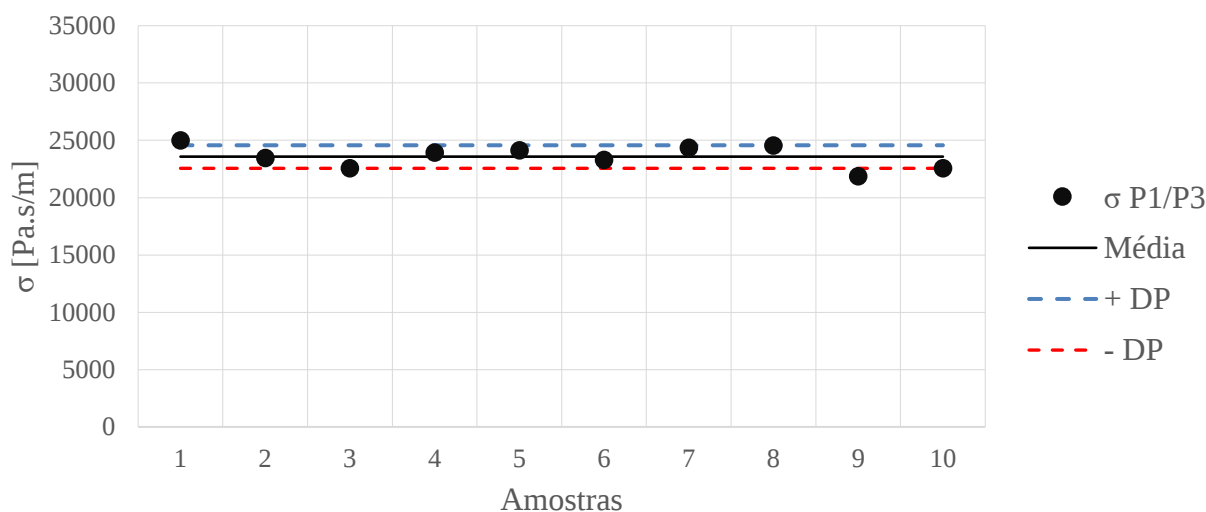
Tabela 18: Medição de resistividade ao fluxo das amostras de PUCN

AMOSTRA CANA/PUCA	P 1 [Pa]	P 2 [Pa]	P 3 [Pa]	P1-P3 [Pa]	T [C°]	c [m/s]	l [m]	σ P1/P3 [Pa.s/m]
1	0,061	0,0119	0,0236	0,0373	26,1	346,67	0,0165	24983,99
2	0,045	0,0148	0,0386	0,0068	26,1	346,67	0,0175	23445,31
3	0,047	0,0098	0,0400	0,0069	26,1	346,67	0,0182	22543,83
4	0,051	0,0242	0,0303	0,0205	26,1	346,67	0,0172	23919,71
5	0,051	0,0129	0,0258	0,0247	26,1	346,67	0,0170	24127,90
6	0,044	0,0142	0,0316	0,0127	26,1	346,67	0,0176	23288,24
7	0,047	0,0258	0,0303	0,0165	26,1	346,67	0,0169	24333,61
8	0,058	0,0060	0,0297	0,0278	26,1	346,67	0,0168	24539,74
9	0,049	0,0183	0,0362	0,0123	26,1	346,67	0,0188	21861,17
10	0,033	0,0272	0,0540	0,0215	26,1	346,67	0,0181	22556,99

Fonte: A autora, 2024.

As medições das amostras de PUCN no Gráfico 4 indicam que as amostras 1 e 8 apresentaram maiores valores, 24983,99 e 24539,74 Pa.m/s respectivamente.

Gráfico 4: Medição de resistividade ao fluxo das 10 amostras de PUCN



Fonte: A autora, 2024.

As amostras 1 e 8 apresentaram os maiores valores, sendo 24983,99 e 24539,74 Pa.s/m, enquanto que as amostras 3 e 9 apresentaram valores menores, sendo 22543,83 e 21861,17 Pa.s/m, respectivamente. A média obteve 23577,99 Pa.s/m e a variação do desvio padrão foi de 22557,29 a 24569,59 Pa.s/m. Dentre as três medições, as amostras de PUCN foram as que apresentaram resultados mais consistentes, com baixo desvio padrão em relação às outras medições.

6.2 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA – Frequências de 100-1600 e 400-1600 Hz.

Neste experimento, foi usado o tubo de impedância, tal como descrito no cap. 5, tópico II, em função de transferência. Para este método, em conformidade com ASTM 1050-10, foi feito o experimento nas frequências de 100-1600 Hz e 400-6400 Hz. As amostras avaliadas com diâmetro de 100 mm e espessura aproximada de 15 mm são as mesmas utilizadas no experimento de resistividade ao fluxo. Contudo, as mesmas amostras avaliadas em baixa frequência, de 100 a 1400 Hz, tiveram que ser cortadas para o diâmetro de 28 mm para que fossem efetuadas as medições em alta frequência, de 400 a 6000 Hz.

6.2.1 Experimentos nas frequências 100-1600 Hz

Para a medição nas frequências de 100-1600 Hz, as amostras foram avaliadas aplicando os estudos de Pilon (Panneton *et al.*, 2003; Pilon *et al.*, 2004), Iwase (T. Iwase, Y. Izumi e and R. Kawabata, 1980) e Olney (Olney e Panneton, 2008) e (Olney, Panneton e Tran-van, 2002). Com isso, foram feitos dois tipos de medição, sendo as medições com alfinetes e medições com plasticina nas bordas. As Tabela 19 (a-b) ilustram um comparativo das propriedades das amostras sem e com alfinetes.

Tabela 19: Em (a) amostras sem alfinetes e em (b) amostras com alfinetes.

Fibras/PUCA sem alfinete	Espessura [mm]	Densidade [kg/m ³]	Fibras/PUCA com alfinete	Espessura [mm]	Densidade [kg/m ³]
Coco	15,97 ± 1,30	83,7 ± 7,02	Coco	15,97 ± 1,30	108,72 ± 7,72
Sisal	14,00 ± 1,05	98,87 ± 7,94	Sisal	14,00 ± 1,06	126,97 ± 9,02
Cana-de-açúcar	17,46 ± 0,73	119,68 ± 14,78	Cana-de-açúcar	17,46 ± 0,73	164,16 ± 17,26

(a)

(b)

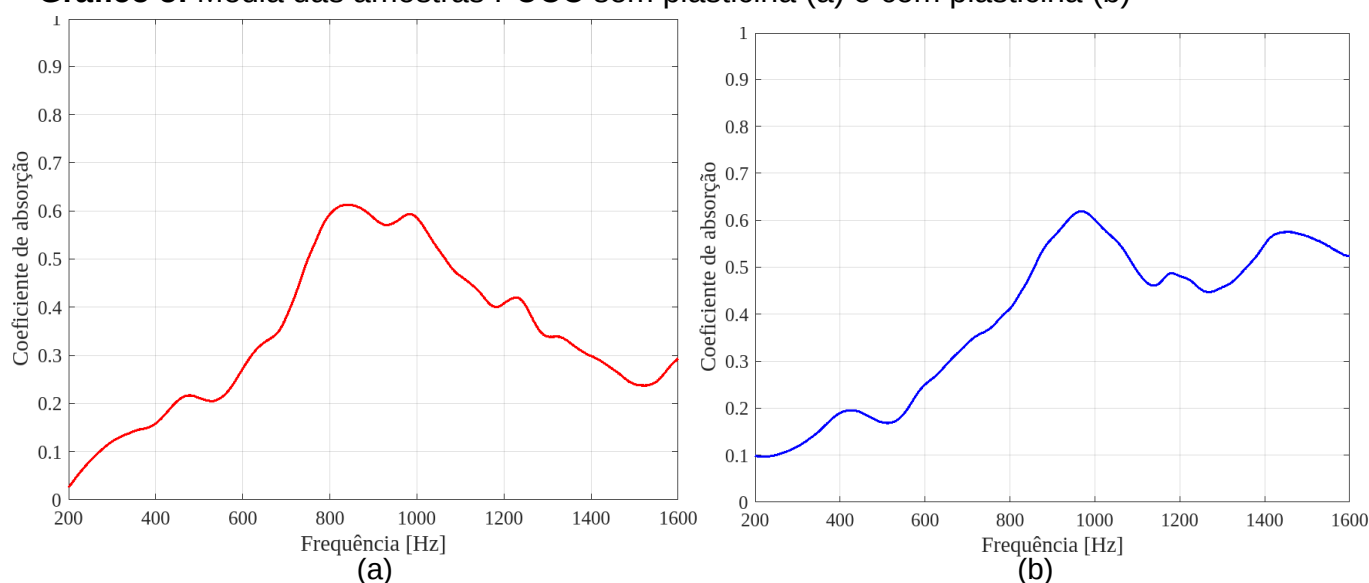
Amostras sem Alfinetes e com plasticina

Para as amostras avaliadas sem alfinetes, foi realizado um teste com um reforço nas bordas, com uso de plasticina (massa de modelar), sendo executado conforme as orientações da ASTM 1050-10. O intuito do teste foi aumentar a eficiência dos resultados, evitando a ressonância e os efeitos de borda, tal como indica Pilon *et al.* (2004); contudo, notou-se que o uso de plasticina, em alguns casos, alterou as respostas dos experimentos.

É importante ressaltar as denominações das amostras que estão abreviadas como: espuma de polioli de cana-de-açúcar PUCA; fibra de coco e espuma de polioli de cana-de-açúcar PUCC; fibra de sisal e espuma de polioli de cana-de-açúcar PUSS; fibra de cana-de-açúcar e espuma de polioli de cana-de-açúcar PUCN.

O Gráfico 5 é um comparativo das amostras que foram medidas sem plasticina (a) e com plasticina nas bordas da amostra em (b). Os resultados dos gráficos seguintes foram feitos com a média das 10 amostras PUCC, sendo (a) sem plasticina nas bordas e (b) com plasticina nas bordas.

Gráfico 5: Média das amostras PUCC sem plasticina (a) e com plasticina (b)



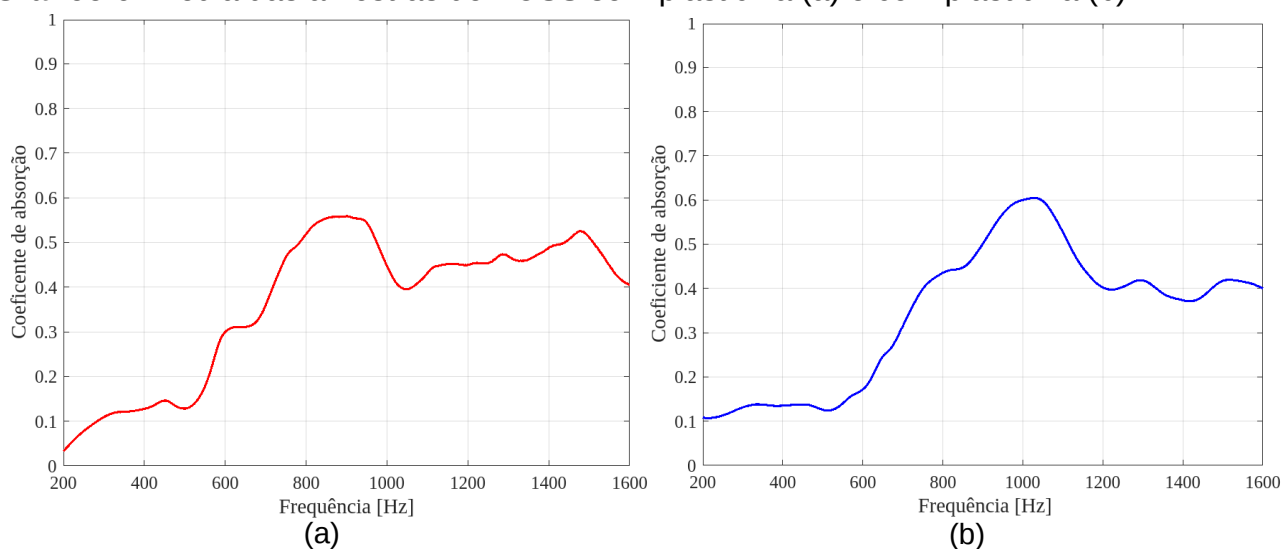
Fonte: A autora, 2024.

O Gráfico 5 (a), sem uso de plasticina na borda, apresentou um ganho de absorção sonora apenas nas faixas de frequências de 800 a 890 Hz e 990 a 1000 Hz, com coeficiente de absorção α médio de 0,6. Contudo, no Gráfico 5 (b), a absorção sonora permaneceu mais evidente e com maior constância nas faixas de frequência de 990 a 1600 Hz, com α variando de 0,5 a 0,6; Porém, ocorreu menor absorção nas faixas de 200 a 800Hz. Considerando que

ambos os resultados são bons, o Gráfico 5 (a) se destaca por ter um ganho maior nas frequências de 800 Hz.

As amostras de PUSS sem a plasticina resultaram em maior ganho em uma faixa mais extensa de absorção sonora, sendo nas frequências de 790 a 980 Hz, com absorção sonora α média de 0.4 a 0.5 e menor absorção sonora nas faixas de frequência de 200 a 650 Hz. Além disso, houve outro ganho na faixa de frequência de 1498 Hz com absorção sonora de 0,53, conforme o gráfico 6 (a). No Gráfico 6 (b), com o uso de plasticina nas bordas, houve uma contribuição para que o ganho de absorção sonora ficasse mais evidente na frequência de 990 a 1070Hz, com o maior pico de absorção sonora em 0,6. Os pontos mais baixos de absorção no gráfico 6 (b) ocorrem nas frequências de 200 a 790 Hz e de 1200 a 1600 Hz, conforme os gráficos abaixo. O Gráfico 6 (a) se destaca por apresentar um ganho maior de absorção sonora na faixa de frequência de 800 Hz.

Gráfico 6: Média das amostras de PUSS sem plasticina (a) e com plasticina (b)

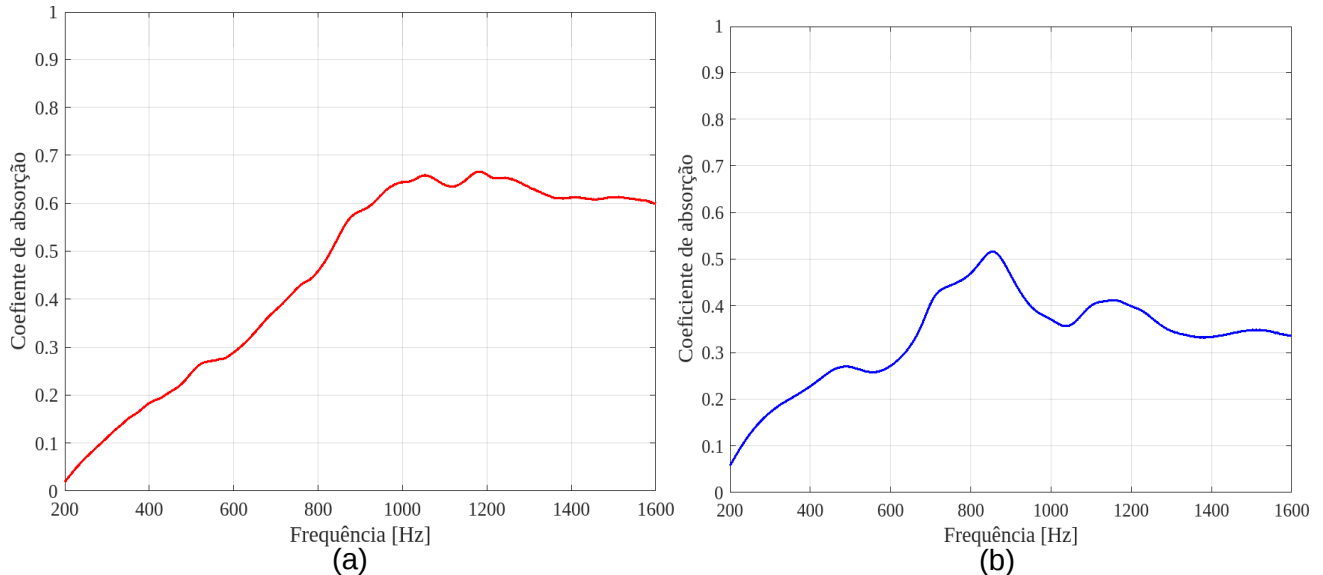


Fonte: A autora, 2024.

As amostras de PUCN obtiveram um comportamento diferente das amostras anteriores. As amostras com plasticina apresentaram uma baixa absorção sonora em uma escala maior de frequência quando comparadas com as amostras medidas sem plasticina de cana-de-açúcar. No Gráfico 7 (a), as amostras sem plasticina apresentaram um ganho significativo nas frequências de 820 a 1600 Hz, com uma absorção sonora variando de 0,6 a 0,65, e uma baixa absorção nas frequências de 200 a 600 Hz. As amostras com plasticina, (Gráfico 7 (b)), apresentaram uma baixa absorção nas faixas de frequência em que houve o maior ganho nas amostras sem plasticina do (Gráfico 7 (a)). As amostras com plasticina exibiram

a melhor absorção na frequência de 860 Hz com absorção de 0,5 e menor absorção em várias faixas de frequências, contudo com maior evidência nas frequências de 200 a 650 Hz e nas faixas de frequência de 1000 a 1600 Hz.

Gráfico 7: Média das amostras de PUCN sem plasticina (a) e com plasticina (b)



Fonte: A autora, 2024.

Após a avaliação com e sem a plasticina, foi definido que as medições ficariam sem o uso da massa de modelar nas bordas, pois os resultados demonstraram-se mais promissores sem a plasticina para a absorção sonora.

Amostras com alfinetes

As amostras com alfinetes foram executadas tal como realizado nos estudos clássicos de T. Iwase *et al.* (1980), Olney *et al.* (2002) e Olney e Panneton, (2008) que reduziram a ressonância causada nos poros das amostras porosas com pequenas agulhas ou alfinetes, conseguindo mais estabilidade nas amostras. Nesta tese, foram realizadas com esses métodos por entender que a espuma é ressonante e o método tende a reduzir os efeitos de ressonância (método descrito no cap. 5.3.3).

Com isso, foi manuseada a quantidade de 40 alfinetes em cada amostra, sendo alfinetes de diâmetro de 0,65 mm e 29 mm de comprimento (alfinetes nº 29) e alfinetes para as amostras de PUSS e PUCC. Para as amostras de PUCN, foram usados os alfinetes de diâmetro 0,90 e comprimento 32 mm (alfinetes nº 32). A escolha dos alfinetes, conforme as

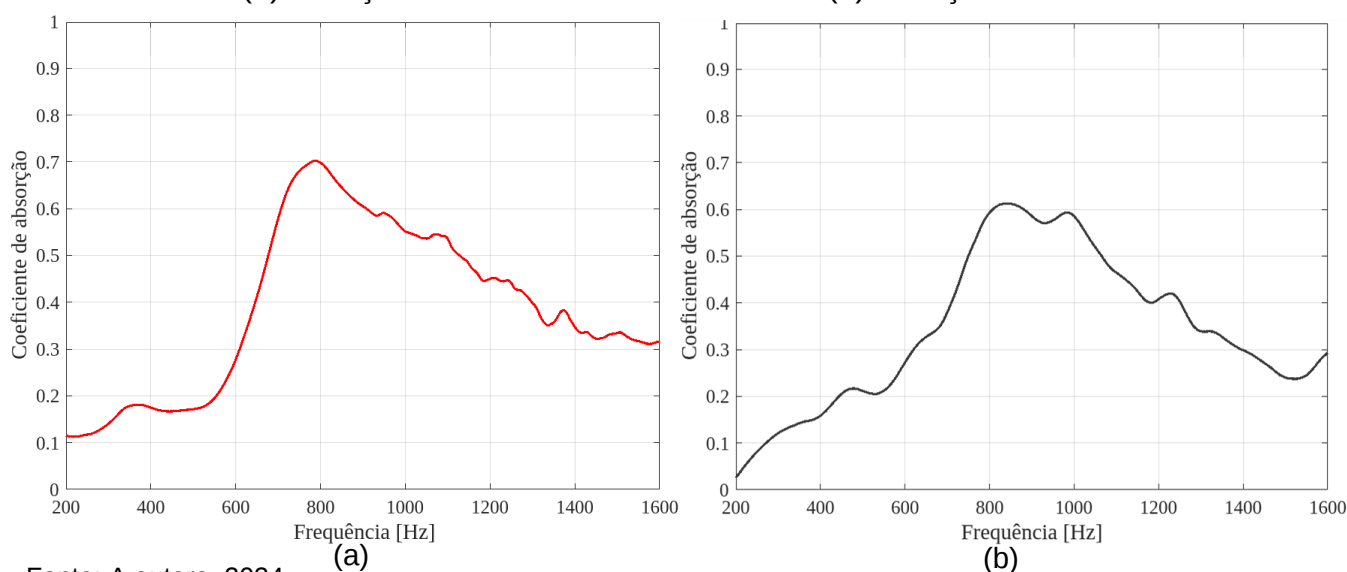
fibras, se deram pela resistência, pois, nas amostras de PUCN, os alfinetes n°32 não apresentaram deformidade ao serem manuseados.

Os gráficos seguintes foram feitos com a média das medições das 10 amostras com e sem alfinetes. Todos os gráficos resultantes de todas as amostras estão no apêndice.

Fibra de coco/PUCA (PUCC)

As amostras de PUCC, avaliadas com os 40 alfinetes de n°29, apresentaram (gráfico 8 (a)) ganho expressivo na frequência de 790 a 800 Hz, com absorção sonora α de 0,7 e, nas frequências de 900 a 1100 Hz, uma variação de absorção sonora de 0,55 a 0,6. A menor absorção das amostras ocorreu nas primeiras frequências que ficou nas faixas de 200 a 600 Hz. No Gráfico 8 (b), o alcance maior do coeficiente de absorção sonora foi de 0,6 nas frequências de 800 a 890 Hz e 990 a 1000 Hz.

Gráfico 8: Em (a) medição da PUCC com alfinetes. Em (b) medição sem alfinetes



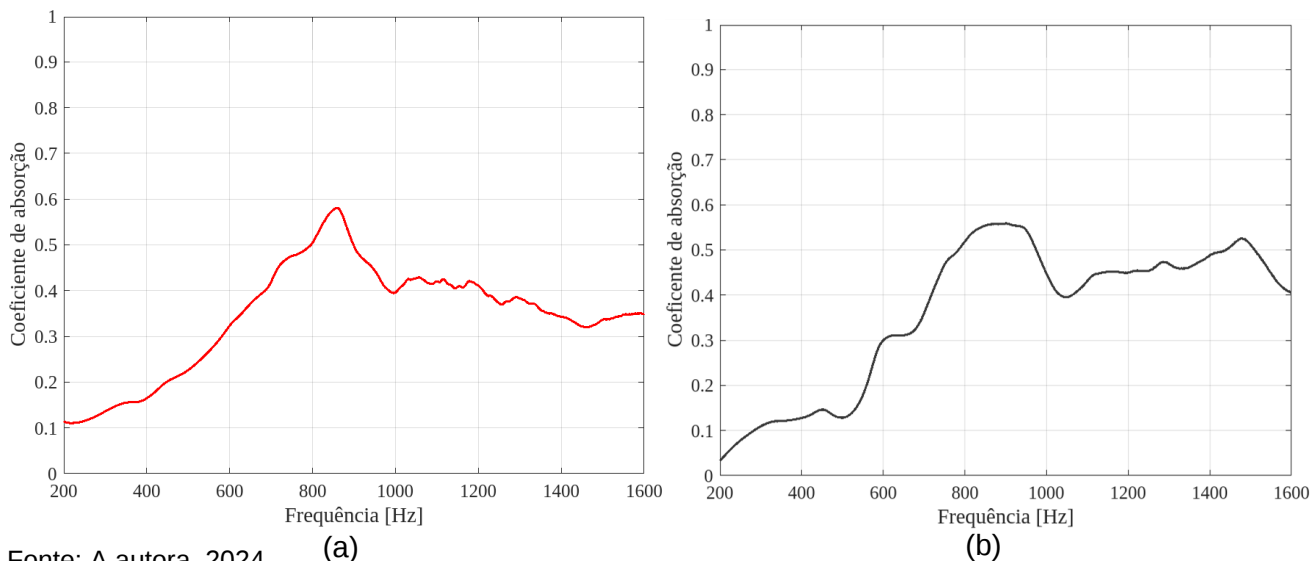
Fonte: A autora, 2024.

Fibra de sisal/PUCA (PUSS)

As amostras de PUSS foram avaliadas com 40 alfinetes n°29 Gráfico 9 (a). Nesta medição, houve ganho expressivo na frequência de 860 Hz, com absorção sonora de 0,59 e nas frequências de 900 a 1600 Hz, queda na absorção sonora, variando de 0,42 a 0,35. A menor absorção das amostras de fibra de coco ocorreu nas primeiras frequências do gráfico, nas faixas de 200 a 600 Hz. No Gráfico 9 (b), houve maior ganho em uma faixa mais extensa de absorção sonora; nas frequências de 790 a 980 Hz houve absorção sonora média de 0,1

a 0.3 e menor absorção sonora nas faixas de frequência de 200 a 650 Hz. Além disso, houve outro ganho na faixa de frequência de 800 a 950 Hz com absorção sonora de 0,53.

Gráfico 9: Em (a), medição da PUSS com alfinetes. Em (b), medição sem alfinetes

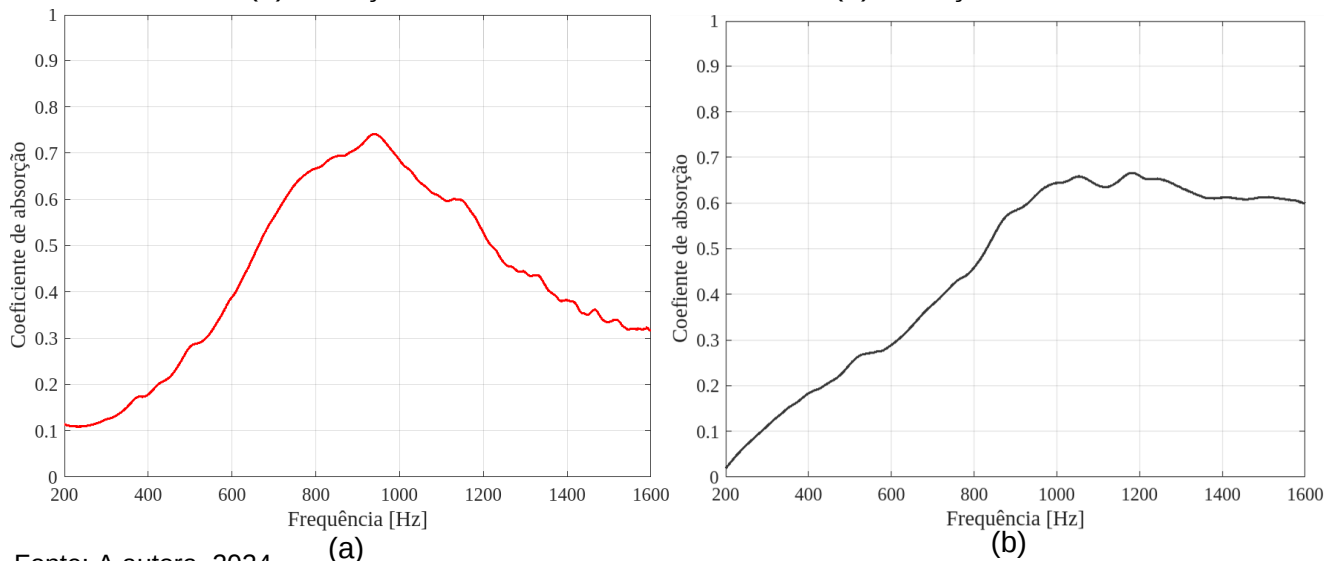


Fonte: A autora, 2024.

Fibra de cana-de-açúcar/PUCA (PUCN)

As amostras de PUCN, com 40 alfinetes nº32, apresentaram alcance maior na absorção sonora na frequência 980 Hz, com coeficiente de absorção de 0,74. Contudo, não mantiveram uma constância no coeficiente de absorção nas frequências de 1000 a 1600 Hz, conforme o Gráfico 10 (a). No Gráfico 10 (b), as amostras sem alfinetes demonstraram constância na absorção sonora de 0,6 nas faixas de frequência de 1000 a 1600 Hz.

Gráfico 10: Em (a) medição da PUCN com alfinetes. Em (b) medição sem alfinetes



Fonte: A autora, 2024.

Os resultados demonstraram que as amostras de PUCN com os alfinetes aumentaram o alcance da absorção sonora, além de aumentarem o controle dos efeitos de ressonância em poucas faixas de frequência; entretanto, após atingir o maior pico de absorção, ocorreu uma diminuição no coeficiente de absorção na escala das frequências. Nas amostras de PUCC e PUSS, os efeitos de ressonância foram reduzidos; além disso, houve um pequeno ganho na absorção sonora, menor que as amostras de PUCN.

O uso dos alfinetes é empregado somente para o controle da ressonância na camada porosa das amostras, sendo recomendado somente para esse fim.

6.2.2 Experimentos nas frequências de 400 – 6400 Hz

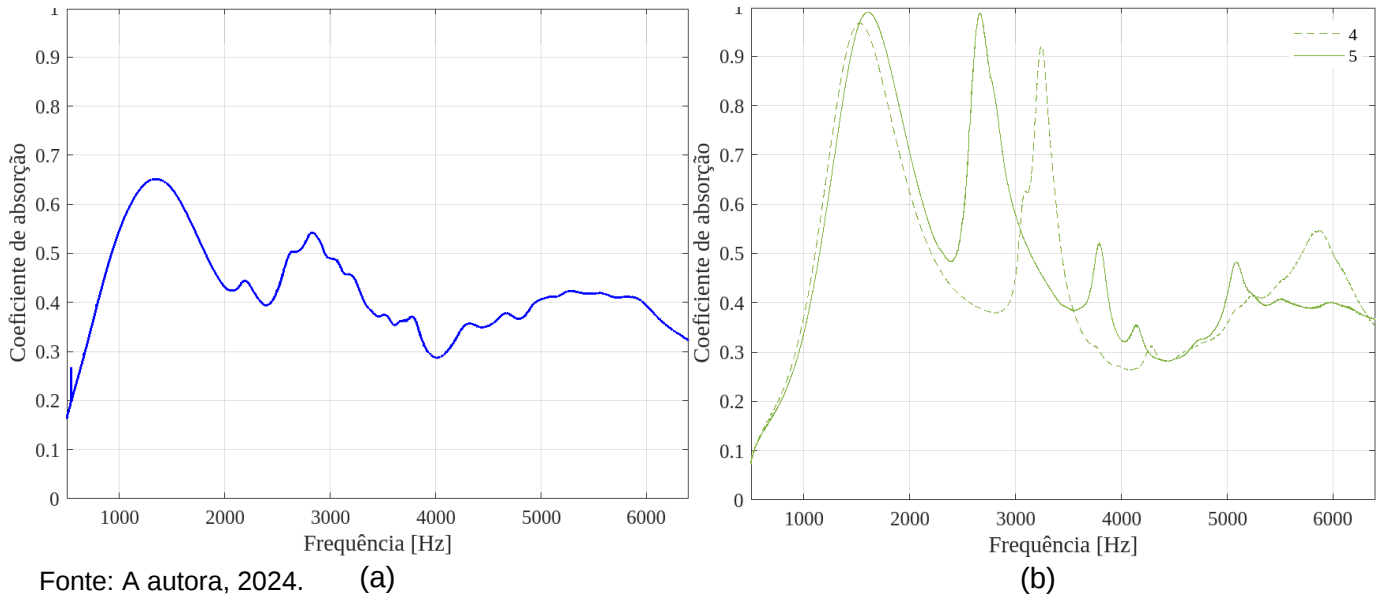
A medição nas frequências de 400-6400 Hz foi executada em conformidade com ASTM 1050, sendo mensurada nos equipamentos mencionados no Cap. 5, seção 5.3, tópico IV. As mesmas amostras usadas nos métodos de resistividade ao fluxo e função de transferência nas frequências 100-1600 Hz foram cortadas em prensa para o tamanho de 28 mm. Nestas medições, não foi necessário usar plasticina nas bordas, pois as amostras ficaram rentes ao tubo. Os alfinetes não foram aplicados nas amostras, pois não foi identificada necessidade do uso. Todas as amostras foram avaliadas nas frequências de 400 a 6400 Hz, sendo gerados dois gráficos, os gráficos das médias (a_s) e os gráficos dos melhores resultados (b_s). Todos os gráficos resultantes de todas as amostras estão no apêndice.

Fibra de coco/PUCA - PUCC

As 10 amostras de PUCC estão apresentadas com uma média no gráfico (a) e com duas amostras selecionadas das dez amostras medidas (amostras 4 e 5) no Gráfico 11 (b). No Gráfico 11 (a), há um maior ganho no coeficiente de absorção de 0,65 na frequência 1400 Hz. O gráfico 11-b é representado por duas amostras que mais se destacaram nas medições. A frequência 2900 Hz apresenta uma absorção sonora de 0,54 e, nas frequências de 5000 a 6000 Hz, o coeficiente de absorção de 0,4. No gráfico 11 (b), a amostra 4 obteve dois grandes picos de coeficiente de absorção de 0,97 e 0,91 nas frequências 1500 e 3300 Hz respectivamente. Na amostra 5, os dois grandes picos ficaram com coeficientes de absorção de 0,99 nas frequências 1600 e 2600 Hz. Os Gráficos (a) 12, (a) 14 e (a) 16 abordam os indicativos das regiões de ressonância de membrana das amostras no tubo de impedância. Seus respectivos Gráficos (b) 12, (b) 14 e (b) 16 identificam os ângulos de fase quando a

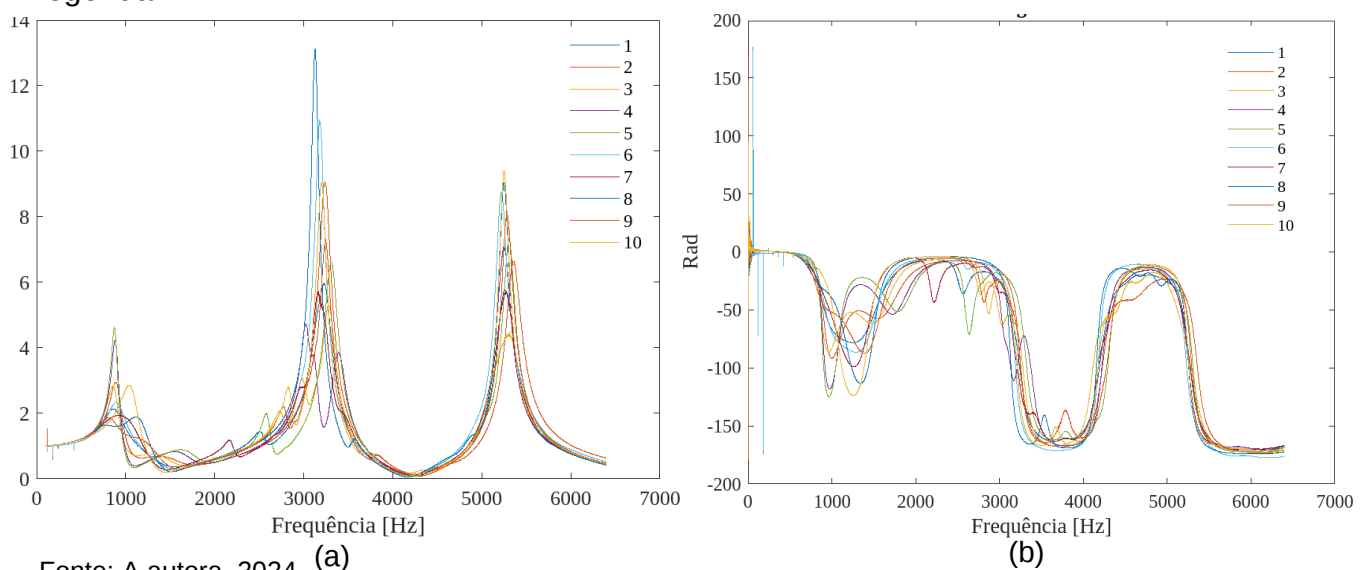
onda passa por uma região de ressonância apresentando um ângulo que varia até 180° . Além disso, quando o ângulo fica perto de 90° há uma proximidade da sua frequência natural.

Gráfico 11: Em (a), média das 10 amostras e em (b), medições das amostras 4 e 5



O Gráfico 12 traz a função resposta das amostras de fibras de coco/PUCA e o ângulo de fase. O Gráfico (a) mostra os efeitos de ressonância de membrana mais acentuado nas frequências 3100 Hz e 5200 Hz. Para descrever a diferença de fase de entrada e saída do sistema em função da frequência, foi feito o ângulo fase, Gráfico (b). A ressonância presente no ângulo de fase, próximo de 180° , nas frequências 1600-3000 Hz e 4600-5000 Hz.

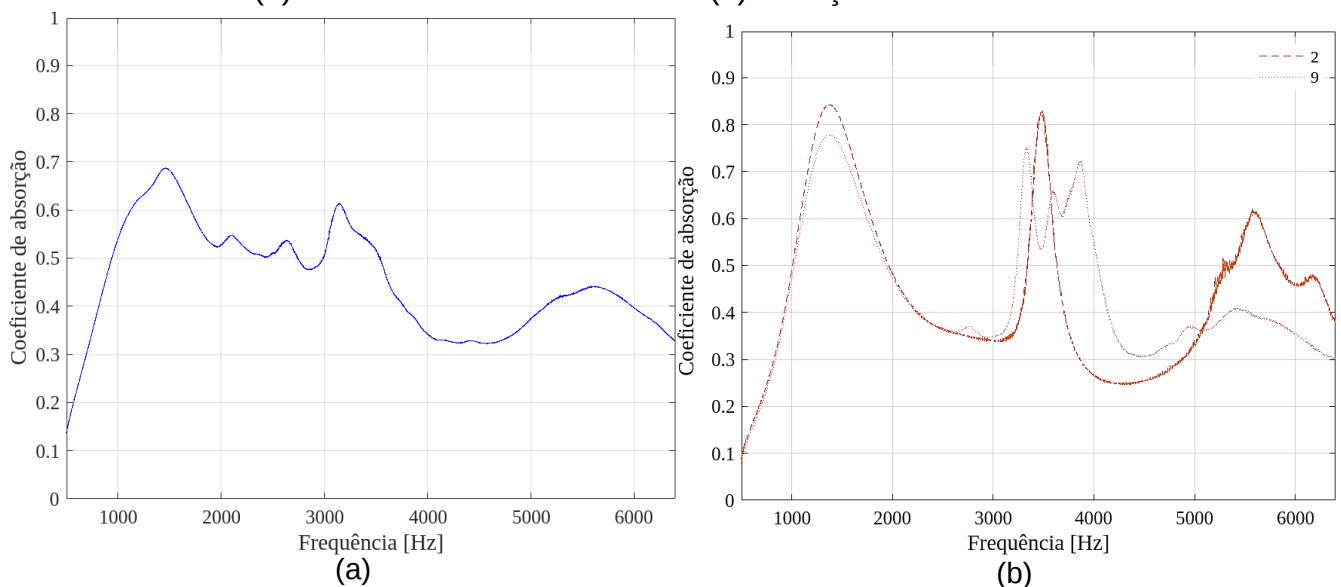
Gráfico 12: Em (a), Função resposta. Em (b), o ângulo fase. Amostras enumeradas na legenda



Fibra de sisal/PUCA - PUSS

As 10 amostras de PUSS medidas em alta frequência são apresentadas com uma média no gráfico 13 (a) e com duas amostras (amostras 2 e 9) no Gráfico 13 (b). Na média das amostras (Gráfico 13 (a)), há um maior ganho no coeficiente de absorção de 0,68 e 0,61 nas frequências 1400 e 3100 Hz respectivamente. As frequências 4000 a 4800 Hz apresentam uma baixa na absorção sonora de 0,31. No Gráfico 13 (b), a amostra 2 obteve dois grandes picos de coeficiente de absorção de 0,82 e 0,81 nas frequências 1400 e 3500 Hz respectivamente; na amostra 9, os dois grandes picos ficaram com coeficientes de absorção de 0,78 e 0,75 nas frequências 1400 e 3400 Hz.

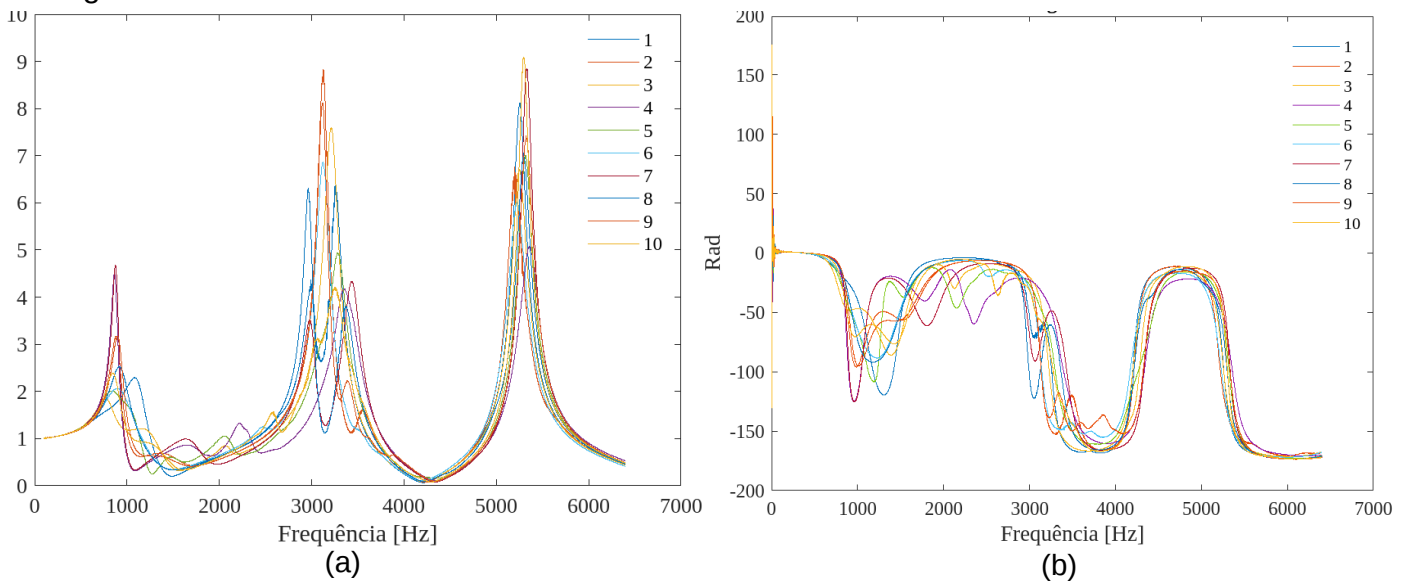
Gráfico 13: Em (a) média das 10 amostras. Em (b) medições amostra 2 e 9



Fonte: A autora, 2024.

O Gráfico 14 traz a função resposta das amostras de fibras de sisal/PUCA e o ângulo de fase. O Gráfico (a) mostra os efeitos de ressonância de membrana mais acentuado nas frequências 3099 Hz e 5300 Hz. Para descrever a diferença de fase de entrada e saída do sistema em função da frequência, foi feito o ângulo fase, Gráfico (b). A ressonância presente no ângulo de fase, próximo de 180° , nas frequências 1700-3000 Hz e 4400-5100 Hz.

Gráfico 14: Em (a), Função resposta. Em (b), o ângulo fase. Amostras enumeradas na legenda

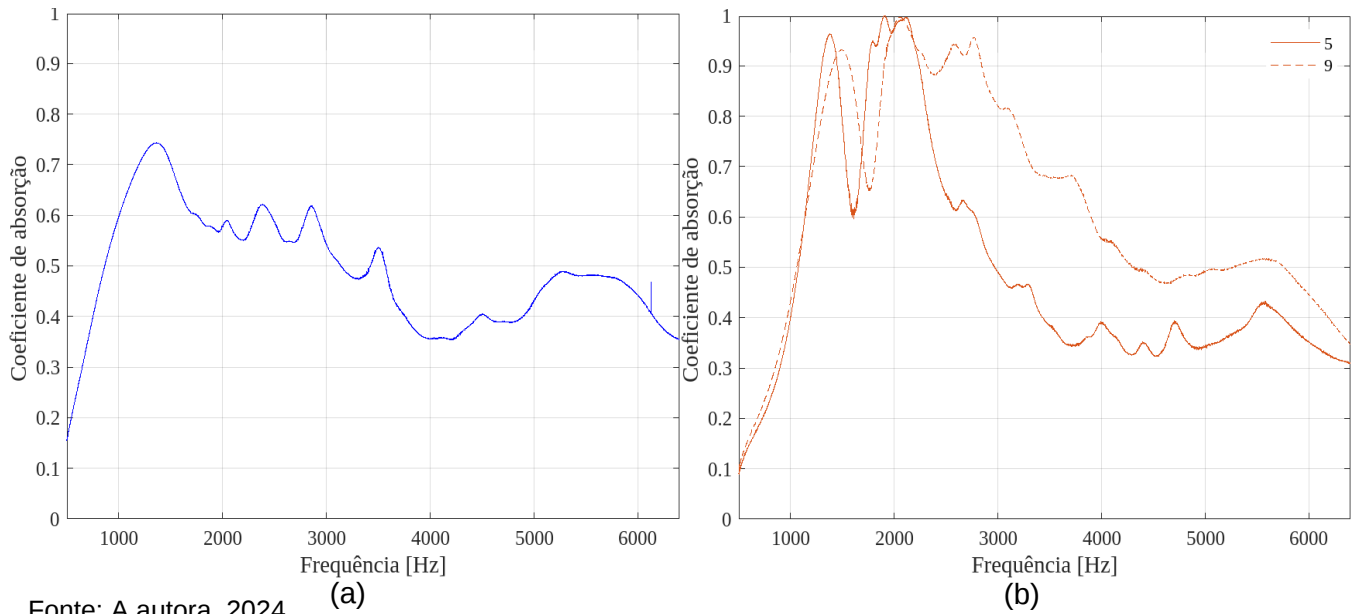


Fonte: A autora, 2024.

Fibra de cana-de-açúcar/PUCA - PUCN

As 10 amostras de PUCN medidas em alta frequência são apresentadas com uma média no gráfico 15 (a) e com duas amostras (amostras 5 e 9) no Gráfico 15 (b). Na média das amostras (Gráfico 15 (a)), há um maior ganho no coeficiente de absorção de 0,74, 0,61 e 0,609 nas frequências 1380, 2400 e 2800 Hz respectivamente. As frequências 4000 a 4180 Hz apresentam uma baixa na absorção sonora de 0,36. No Gráfico 15 (b), a amostra 5 obteve dois grandes picos de coeficiente de absorção de 0,96 e 1,0 nas frequências 1300 e 2100 Hz respectivamente; na amostra 9, os dois grandes picos ficaram com coeficientes de absorção de 0,935 e 1,0 nas frequências 1400 e 2100 Hz. Ainda no Gráfico 15 (b), o coeficiente de absorção mais baixo de 0,31 da amostra 5, na frequência 4550; na amostra 9, o coeficiente de absorção mais baixa de 0,48 na frequência de 4600 Hz.

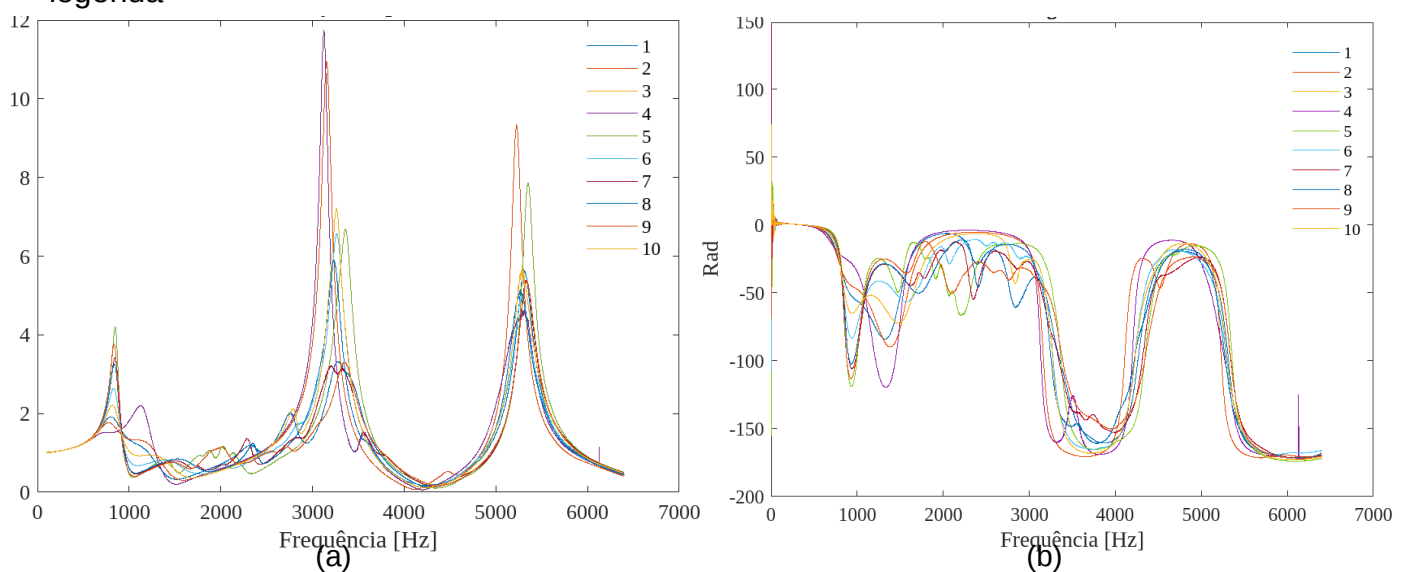
Gráfico 15: Em (a) média das 10 amostras. Em (b) duas medições, amostra 5 e 9



Fonte: A autora, 2024.

O Gráfico 16 traz a função resposta das amostras de fibras de cana/PUCA e o ângulo de fase. O Gráfico (a) mostra os efeitos de ressonância de membrana mais acentuado nas frequências 3099 Hz e 5100 Hz. Para descrever a diferença de fase de entrada e saída do sistema em função da frequência, foi feito o ângulo fase, Gráfico (b). A ressonância presente no ângulo de fase, próximo de 180° , nas frequências 1800-3090 Hz e 4300-5100 Hz.

Gráfico 16: Em (a), Função resposta. Em (b), o ângulo fase. Amostras enumeradas na legenda

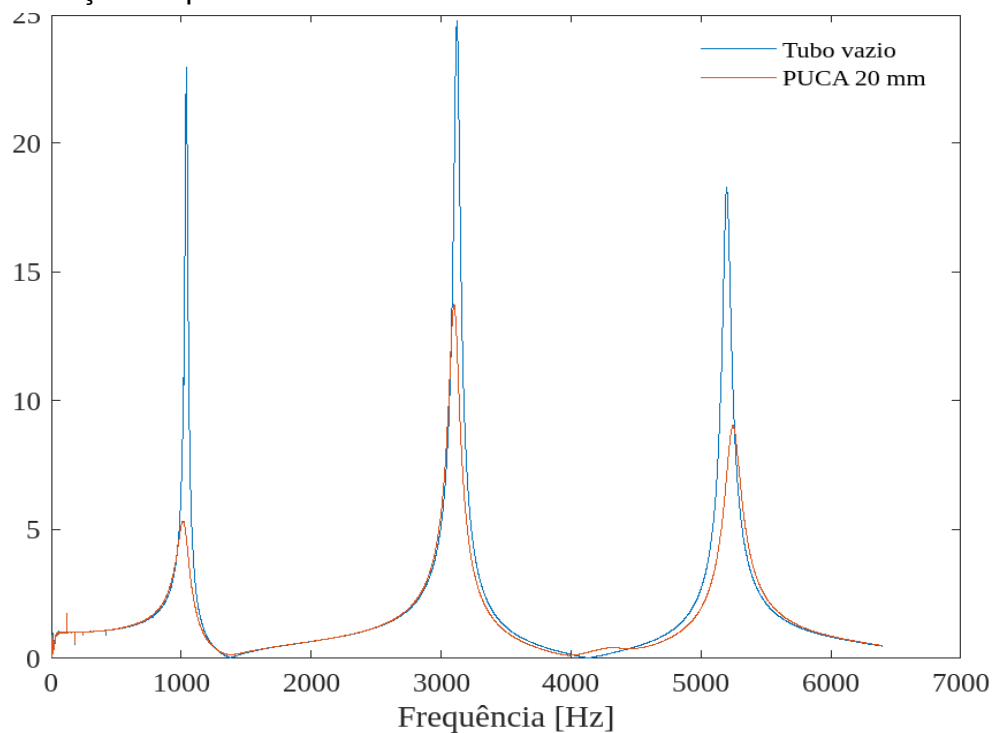


Fonte: A autora, 2024.

Para fazer um comparativo com a função resposta das medições anteriores com o tubo vazio e com uma amostra de espuma de PUCA de 20 mm, foi realizada uma medição com tubo de impedância. Em tais medições, foram aferidas as faixas de frequências que variam de 500 a 6000 Hz. O Gráfico 17 apresenta, em linha azul, o tubo vazio e, em linha vermelha, a medição da amostra.

Em linha azul apresenta os três picos indicando as regiões de ressonância nas frequências 1000 Hz, 3000 Hz e 5250 Hz. Em linha vermelha, a medição somente com espuma, indica as regiões de ressonância com maior intensidade nas frequências 3000 Hz e 5250 Hz.

Gráfico 17: Função resposta do tubo vazio e de uma amostra de PUCA de 20 mm



Fonte: A autora, 2024.

6.3 MÉTODOS EMPÍRICOS:

Para estimar valores segundo as equações empíricas clássicas de Delany e Bazley (DB) e Champoux e Allard (CA), os dados de resistividade ao fluxo foram medidos conforme os estudos de Bies e Hansen e Ingard e Dear. Além disso, as propriedades dos materiais mencionadas na Tabela 20, com os dados de condutividade térmica e calor específico foram obtidos nos estudos mencionados no cap. 5.3.

Tabela 20: Resistividade ao fluxo com as características das amostras

Amostras	σ P1/P3 [Pa.s/m]	Desvio padrão [Pa.s/m]	Espessura [mm]	Condutividade térmica [W/m.K]	Calor específico [J/kgK]
PUCC	25918,47	$\pm 2173,11$	$15,97 \pm 1,30$	0,0540	2009,66
PUSS	29541,17	$\pm 2267,11$	$14,00 \pm 1,06$	0,0430	2009,66
PUCN	23577,99	$\pm 1002,76$	$17,46 \pm 0,73$	0,0436	1800,32

Fonte: A autora, 2024.

As amostras de Sisal/PUCA apresentaram um alto desvio padrão, de $\pm 2267,11$, e o maior valor de resistividade ao fluxo, de 29541,17 [Pa.s/m], mesmo tendo as menores espessuras. As amostras de Coco/PUCA tiveram um desvio padrão inferior ao das amostras de Sisal/PUCA, sendo de $\pm 2173,11$; o valor de resistividade ao fluxo também foi menor que o de sisal, apresentando 25918,47 [Pa.s/m]. As amostras de Cana/PUCA tiveram a menor resistividade ao fluxo, de 23577,99 [Pa.s/m]; as amostras se apresentaram mais estáveis, com baixa variação nos resultados entre amostras, se comparados com as amostras anteriores. Além disso, o seu desvio padrão foi inferior ao das amostras anteriores, sendo de $\pm 1002,76$ e a espessura também acima de 15 mm.

Para determinar o coeficiente de absorção com os métodos empíricos analisados, a partir das equações empíricas de Delany e Bazley (1970) e Allard e Champoux (1991), foram operados conforme os dados da Tabela 20 de cada amostra. Conforme os itens que decorrem na sequência.

6.3.1 Método empírico de Delany e Bazley (DB).

Com os dados presentes de σ e da formulação dos autores Delany e Bazley (DB), conforme as equações 88 e 89, é possível calcular a impedância característica Z_c e o número

complexo de onda k_c , dados da Tabela 20. Assim sendo, obtém-se para cada tipo de amostra (coco/PUCA, sisal/PUCA, cana-de-açúcar/PUCA) os valores de Z_c e k_c .

Coco/PUCA

$$Z_c^{\frac{coco}{\rho_0 c_0}} = 1 + 0.0511 \left(\frac{f}{25918,47} \right)^{-0.75} - i 0.07688 \left(\frac{f}{25918,47} \right)^{-0.73} \quad (134)$$

$$k_c^{\frac{coco}{\rho_0 c_0}} = 1 + 0.0858 \left(\frac{f}{25918,47} \right)^{-0.70} - i 0.1749 \left(\frac{f}{25918,47} \right)^{-0.70} \quad (135)$$

Sisal/PUCA

$$Z_c^{\frac{sisal}{\rho_0 c_0}} = 1 + 0.0511 \left(\frac{f}{29541,17} \right)^{-0.75} - i 0.07688 \left(\frac{f}{29541,17} \right)^{-0.73} \quad (136)$$

$$k_c^{\frac{sisal}{\rho_0 c_0}} = 1 + 0.0858 \left(\frac{f}{29541,17} \right)^{-0.70} - i 0.1749 \left(\frac{f}{29541,17} \right)^{-0.70} \quad (137)$$

Cana-de-açúcar/PUCA

$$Z_c^{\frac{cana}{\rho_0 c_0}} = 1 + 0.0511 \left(\frac{f}{23577,99} \right)^{-0.75} - i 0.07688 \left(\frac{f}{23577,99} \right)^{-0.73} \quad (138)$$

$$k_c^{\frac{cana}{\rho_0 c_0}} = 1 + 0.0858 \left(\frac{f}{23577,99} \right)^{-0.70} - i 0.1749 \left(\frac{f}{23577,99} \right)^{-0.70} \quad (139)$$

A formulação apresenta boa aproximação para as predições de Z_c e k_c nas faixas de frequências entre $0,01 \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1,00$, conforme a seção 5.2.1. Para os dados das medições realizadas com o método de resistividade ao fluxo, serão considerados nas faixas de frequências de $259,18 \leq f \leq 25918,47$ Hz para PUCC, $295,41 \leq f \leq 29541,17$ Hz para PUSS e $235,78 \leq f \leq 23577,99$ Hz para PUCN.

6.3.2 Método empírico de Allard e Champoux (AC).

Com as equações 94 e 95 de Allard e Champoux (AC), sendo considerados os valores das constantes da densidade do ar de $\rho_0 = 1,184 \text{ kg/m}^3$, número de Pradt $N_{pr} = 0,68$, razão do calor específico $\gamma = 1,4$ e pressão atmosférica $P = 101,3 \text{ kPa N/m}^2$, pode-se considerar a densidade dinâmica $\rho(\omega)$ como:

$$\rho(\omega) = \rho_0 + 1 \left[0,0253 + \frac{1}{i2\pi} \left(\frac{\sigma}{\rho_0 f} \right) - i0,0795 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right) \right] \quad (140)$$

As equações com módulo dinâmico de bulk de cada amostras $K(\omega)$ como:

Coco/PUCA

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left(\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 - 0,6773 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-1} [7,3398 + 23,0587i \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)]} \right)^{-1} \quad (141)$$

Sisal/PUCA

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left(\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 - 0,8596 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-1} [11,5763 + 36,3680i \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)]} \right)^{-1} \quad (142)$$

Cana-de-açúcar/PUCA

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left(\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 - 0,7447 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-1} [8,8732 + 27,8760i \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)]} \right)^{-1} \quad (143)$$

Conforme o cálculo das equações 141 e 142-143, é possível encontrar a impedância característica e o número de onda complexo através das sequências de equações:

$$K_c(\omega) = i2\pi \left[\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)} \right]^{1/2} \quad (144)$$

$$Z_c(\omega) = [\rho(\omega)K(\omega)]^{1/2} \quad (145)$$

Com isso, ao substituir os dados da resistividade ao fluxo σ , encontra-se o coeficiente de absorção α , conforme as equações (146) e (147):

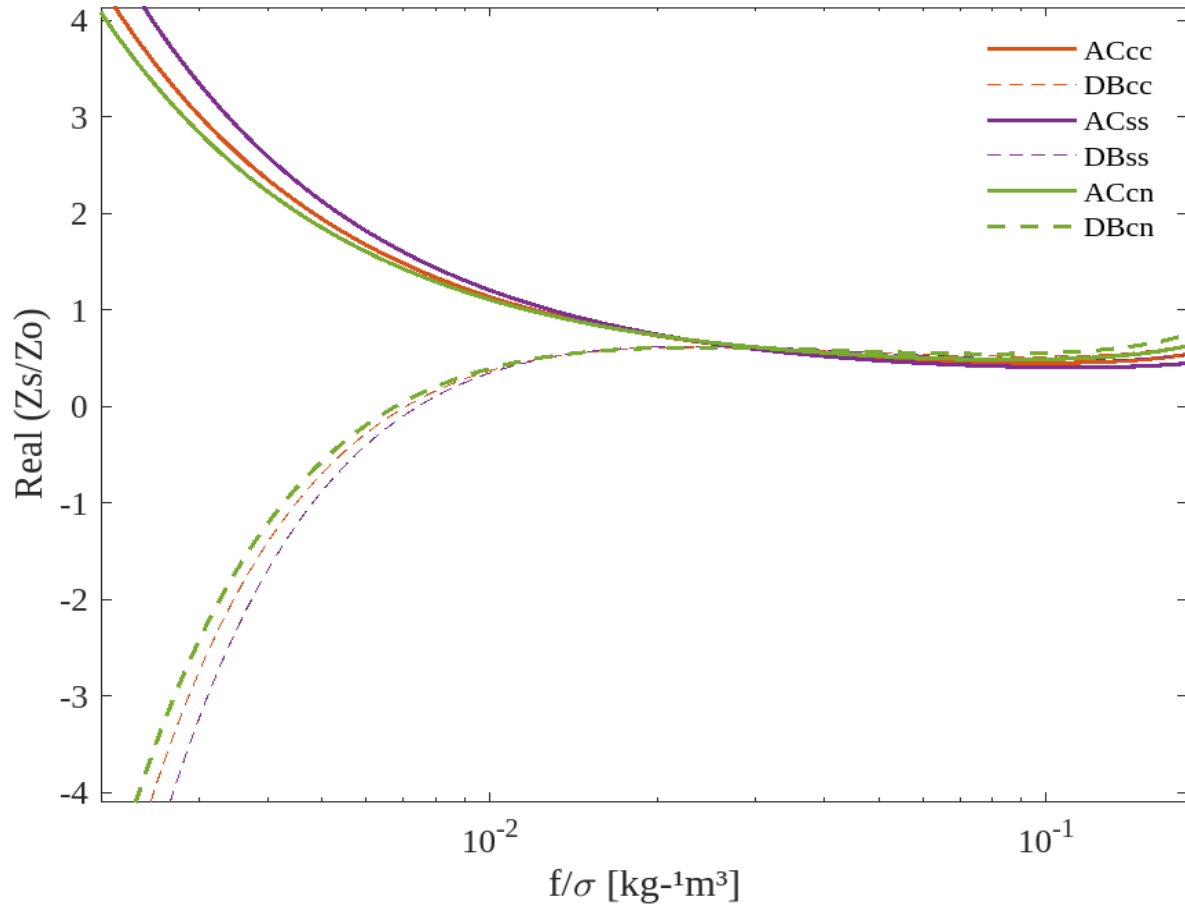
$$Z_s = Z_c(\omega) \coth K_c(\omega) l \quad 146$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_c - \rho_{oco}}{Z_s + \rho_{oco}} \right|^2 \quad 147$$

Os Gráficos 18 – 19 fazem comparações das medições de todas as amostras que foram mensuradas com resistividade ao fluxo e seus parâmetros, sendo aplicadas nas equações empíricas de DB e AC. O Gráfico 18 apresenta a parte real normalizada das amostras de

fibra/PUCA, sendo denominadas: cc como coco/PUCA; ss como sisal/PUCA e cn como cana-de-açúcar/PUCA com os métodos de Allard e Champoux AC e Delany e Basley DB.

Gráfico 18: Parte real normalizada (Z_s) de todas as amostras com os dois métodos



Fonte: A autora, 2024.

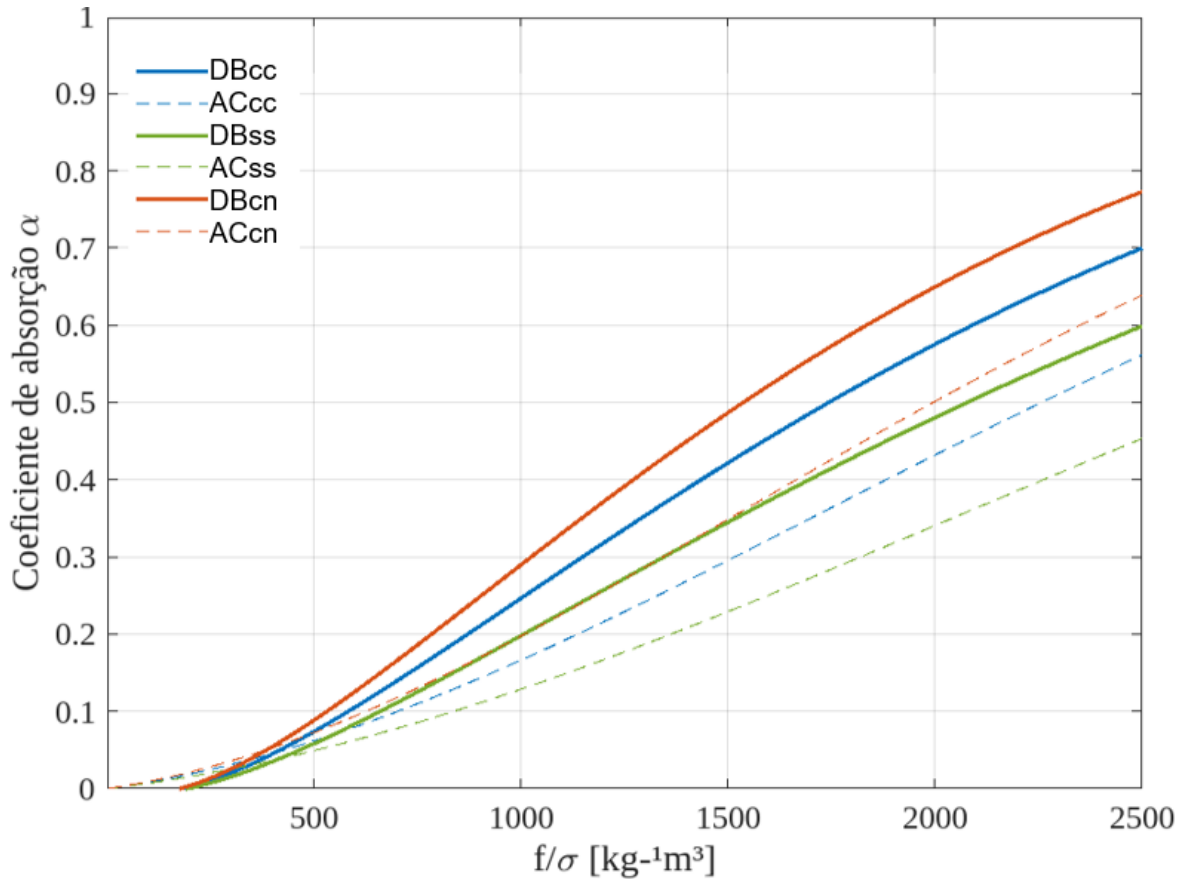
O coeficiente de absorção das amostras com as equações de AC e DB estabeleceram os resultados conforme o Gráfico 19, sendo evidente que as equações de AC apresentaram uma redução das propriedades acústicas em relação aos resultados de DB para todas as amostras. As amostras de sisal/PUCA identificadas como ACss e DBss (as amostras de PUSS no método de AC e DB) apresentaram os resultados mais baixos, sendo medidas nas frequências 1500 Hz, resultando no coeficiente de absorção de 0.25 e 0.35, respectivamente; e as medições na frequência de 2500 Hz com resultado de coeficiente de absorção de 0.45 e 0.56, respectivamente.

O cálculo conforme os métodos AC e DB das amostras de PUCC resultaram no coeficiente de absorção de 0.30 e 0.44 na frequência de 1500 Hz, respectivamente. Nas análises das amostras de PUCN os métodos AC e DB apresentaram os maiores valores de absorção sonora se comparados com os outros resultados das amostras de PUSS e PUCC.

Os resultados exibiram o coeficiente de absorção de 0.35 nos métodos empíricos de AC e o coeficiente de absorção de 0.48 conforme o método de DB, ambos analisados na frequência de 1500 Hz.

Foi observado nas análises das amostras de PUCN, aplicadas nas duas equações empíricas, que todos os resultados apresentaram alta no coeficiente de absorção em ambos os métodos em relação as outras amostras, sendo calculado o seu menor coeficiente de absorção de 0,35 e o seu maior resultado de α 0,78 na frequência de 1500 Hz (vide o gráfico 19 seguinte). Na frequência de 2500Hz, as amostras de PUCN alcançaram o valor do coeficiente de absorção de 0.79 no método de DB e 0.64.

Gráfico 19: Coeficiente de absorção nas equações de DB e AC com as três amostras de fibra/PUCA



Fonte: A autora, 2024.

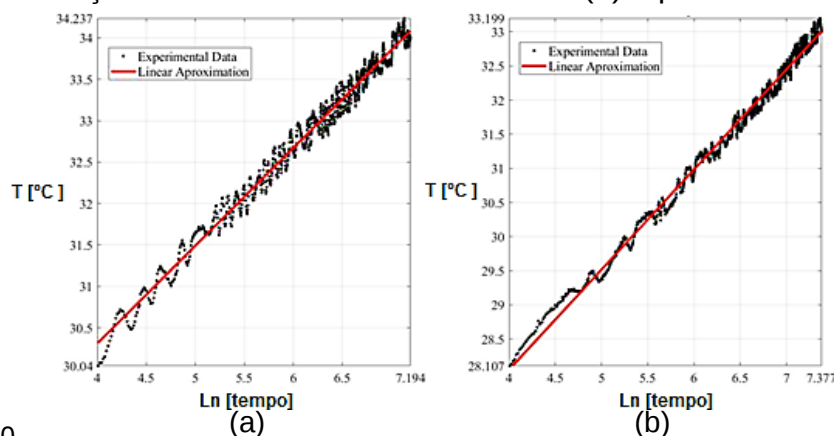
6.4 PROPRIEDADE TÉRMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR E O CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DAS FIBRAS.

6.4.1 Fibra de cana-de-açúcar – Propriedade térmica

Foi analisada somente a fibra de cana-de-açúcar. O Gráfico 20 apresenta um comparativo do comportamento da fibra em ambiente seco e em ambiente úmido. É possível observar a evolução da temperatura com o tempo, para duas situações distintas. Na amostra ressecada, em linha vermelha, as fibras foram previamente ressecadas em estufa por um tempo aproximado de 1 hora, em uma temperatura constante aproximada de 50 °C, e, em seguida, a amostra foi resfriada em ambiente de umidade controlada, com temperatura ambiente de 24°C. A amostra úmida (não ressecadas em estufa), em linha púrpura, não passou pelo tratamento prévio de secagem, embora o experimento tenha sido conduzido em um ambiente de umidade controlada.

Além disso, conforme os estudos de Santos *et al.*, (2020) , no gráfico 20, uma vez delimitada a região linear referente aos dados experimentais, os (gráficos 20 (a) - (b)) apresentam respectivamente a aproximação linear, utilizando o método dos mínimos quadrados para a amostra seca e a amostra úmida. É necessário observar que os dados experimentais, apresentam uma flutuação ao redor valor linear médio determinado numericamente, no valor de $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$. A partir do coeficiente angular da reta, é possível determinar a condutividade térmica das amostras que, para este caso, foi de 0.116 W/(m·K) para amostra úmida e 0,0996 W/(m·K), para amostra seca. Com isso, é possível observar que as amostras ressecadas são boas para a condutividade térmica.

Gráfico 20: Aproximação numérica linear das fibra seca (a) e para fibra úmida (b)



Fonte: Santos, 2020.

6.4.2 Análise do Ciclo de Vida Energético das amostras - ACVEA

O ciclo de vida energético das amostras produzidas no Laboratório de Mecanismos da PUC-PR apresentou como etapas de produção de consumo:

- Consumo total de água;
- Energia na produção;
- Combustível utilizado no transporte da matéria prima até o laboratório.

Na confecção de todas as amostras de fibras naturais, foi usada água para limpeza e água na produção; contudo, o uso para limpeza foi mais frequente devido o processo envolver adesivo e fibra. Para produção das amostras a água que foi utilizada na composição, (Tabela 9 - 10) (cap. 5.1.3), respeitou a seguinte regra: para as fibras de coco e sisal a proporção de água e ficou igual a quantidade de adesivo, enquanto que a fibra de cana-de-açúcar ficou com a proporção de água abaixo da metade do valor do adesivo. Com isso, para equacionar a quantidade total de água usada nas amostras válidas, foi feita a somatória das quantidades usadas, e, em seguida, uma proporcionalidade entre duas grandezas (regra de três) para alcançar a água residual. Então, tem-se a quantidade de água para uma amostra pela quantidade total de fibra usada na produção de todas as amostras produzidas.

Na (Tabela 21), tem-se os dados da água usada, indicados nas colunas quantitativos de fibra e água. A coluna 2 apresenta os quantitativos de fibras usadas para fazer todas as amostras e o quantitativo de PU para amostras de espuma. Na coluna 3, tem-se o total de fibra somente nas amostras válidas para as medições, levando em consideração que muitas amostras foram descartadas por terem características inapropriadas (muito expandida, deformadas, desfazimento do formato). A coluna 4 apresenta o total das fibras das amostras descartadas e a coluna 5, o total de água usado na fabricação de todas as amostras.

A coluna 6 apresenta o total de água usada nas amostras válidas para os experimentos. A coluna 7 apresenta toda água usada para limpeza das mãos nos pós preparos de todas amostras, válidas e não válidas. Esse cálculo foi realizado acrescentando 70% sobre o total de água usada no preparo de todas as amostras. Segundo a SANEPAR, o consumo de água para lavar as mãos, com torneira aberta, gasta 7 litros de água, considerando esse valor como parâmetro do acréscimo de 70% para a água de desperdício coluna 7.

Tabela 21: Inventário do uso de água por kg das fibras

Material	Quantidade total de Material para as amostras [kg]	Quantidade de fibras nas amostras válidas [kg]	Fibra das Amostras descartadas [kg]	Água usada na fabricação em todas amostras [l/m³]	Água das amostras válidas [l/m³]	Água de desperdício +70% [l/m³]
Cana-de-açúcar	2,59	1,635	0,955	0,863	0,54	1,563
Sisal	2,15	1,085	1,065	1,433	0,72	2,133
Coco	4,04	1,046	2,99	2,693	0,69	3,393
PUCA	2 litros	0,194	0,841	-	-	1,735

Fonte: A autora, 2024.

Os consumos de energia embutida na produção das amostras, tais como energia elétrica, combustível de transporte (consumo de combustível para aquisição do material), energia de desperdício (das amostras que não obtiveram sucesso), alcançaram os seguintes dados, conforme a Tabela 22. Os cálculos foram feitos conforme indicado no capítulo 5.3.7, com base nos estudos de Tavares (2006).

Tabela 22: Inventário do consumo de energia embutida, desconsiderando a mão de obra

Fibras	Quantidade de Material [kg]	Massa [kg/ m³]	EE de transporte [MJ/t/kg]	EE inicial no modelo sem a mão de obra [MJ/kg]	EE amostras [MJ/kg]	EE de desperdício [MJ/kg]
Cana-de-açúcar	10	7	3,9627	5,7567	0,24	1,554
Sisal	10	12,12	5,2116	7,8756	0,24	2,424
Coco	10	6,45	2,9025	4,4325	0,24	1,29
PUCA	2	2	0,9	2,04	0,74	0,4

Fonte: A autora, 2024.

Considerou-se a eficiência energética (consumo de combustível de 10 km/l) dos veículos usados no transporte das fibras. Foram considerados, da (Tabela 23), os dados de consumo e quilometragem. Para este cálculo, utilizou-se o menor trajeto/km até o laboratório da PUCPR.

Tabela 23: Consumo de combustível da origem até o laboratório de mecanismos

Fibras	Quantidade [kg/m ³]	Combustível [l]	Quilometragem [km]
Coco	7,77	43	430
Sisal	12,12	45	447
Cana-de-açúcar	6,65	51	511
PUCA	2 litros	57	572

Fonte: A autora, 2024.

A confecção das amostras da parte fibrosa não demonstrou ser nociva ao meio ambiente. Contudo, se for considerada uma escala maior, a nível industrial, pode causar alguns impactos devido a quantidade de adesivo a ser acrescentado na massa do produto. As amostras na sua totalidade, de fibra e camada de PUCA, apresentam duas características distintas; embora a fibra seja menos agressiva ao meio ambiente, o adesivo e a parte da amostra feita de poliuretano possuem maior resistência para se decompor. O adesivo da marca Cascorez não apresenta dados sobre ecotoxicidade. Quanto à persistência e degradabilidade da espuma, o fabricante indica que o material não pode ser despejado em curso d'água e nascentes, porque há risco de contaminação. Ainda que a espuma de PUCA tenha parte de seu bicomposto biodegradável, como o polioli de cana-de-açúcar, a mistura do isocianato e o polioli criam ligações químicas rígidas, extremamente fortes, semelhantes ao poliuretano convencional, do qual a natureza não encontrou mecanismos, bactérias, fungos ou protozoários, capazes de quebrar tal sua cadeia, não tendo sido comprovado até os dias atuais o tempo de decomposição de espumas semelhantes.

CAPÍTULO 7

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Introdução

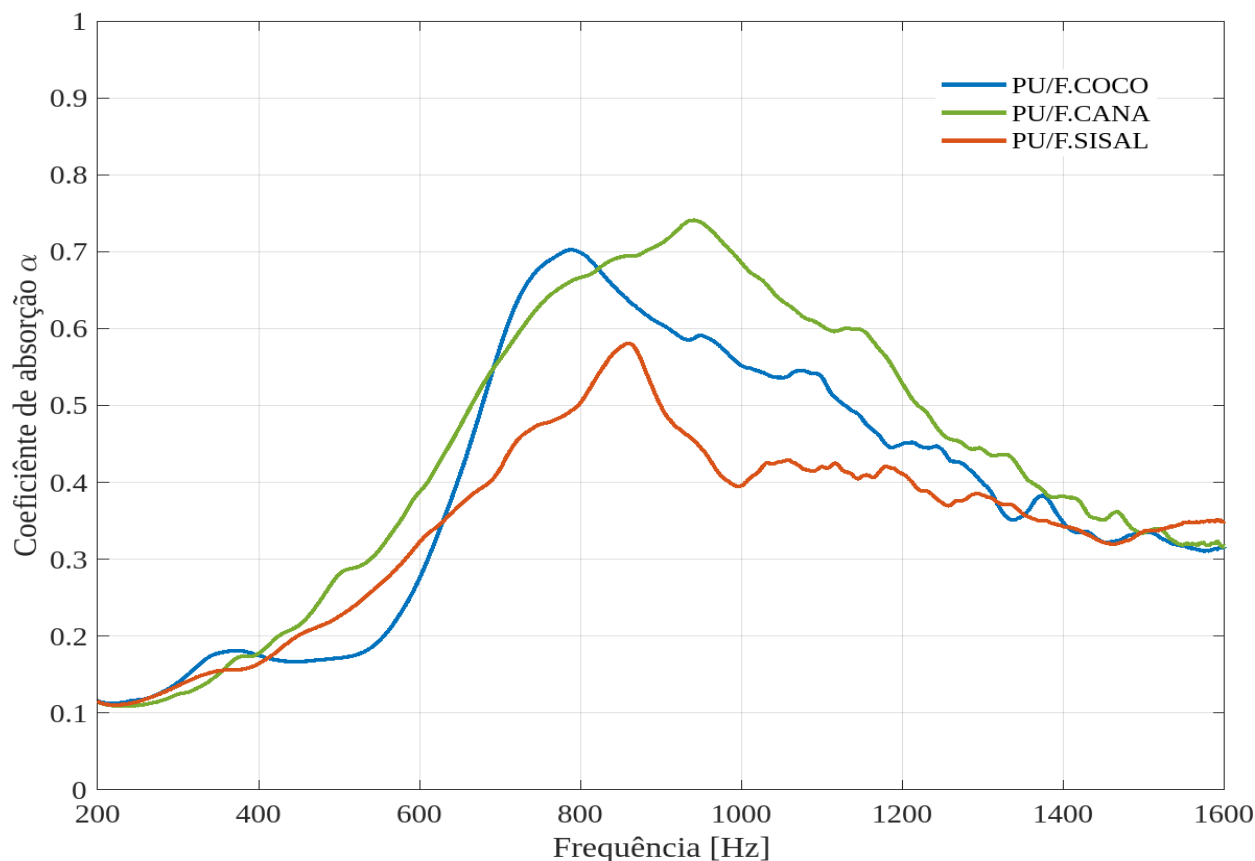
Após realizar os experimentos e estudos das propriedades das amostras, foram feitos os comparativos dos resultados envolvendo os métodos experimentais em baixa frequência, método experimental em alta frequência, resultado das amostras nas equações empíricas, e comparação de todos os métodos.

7.1 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS EXPERIMENTAIS

7.1.1 Faixas de frequências de 100 - 1600 Hz

Como o método da função de transferência foi realizado em tubo de impedância, foram feitas 10 medições de cada tipo de fibra das amostras, com 40 alfinetes cada amostra, sem plasticina nas bordas e com plasticina. A incidência da onda sonora se fez na face com espuma e com os alfinetes, para as amostras avaliadas com alfinetes. Todas as medições foram realizadas em uma sala acústica com vedação de espuma.

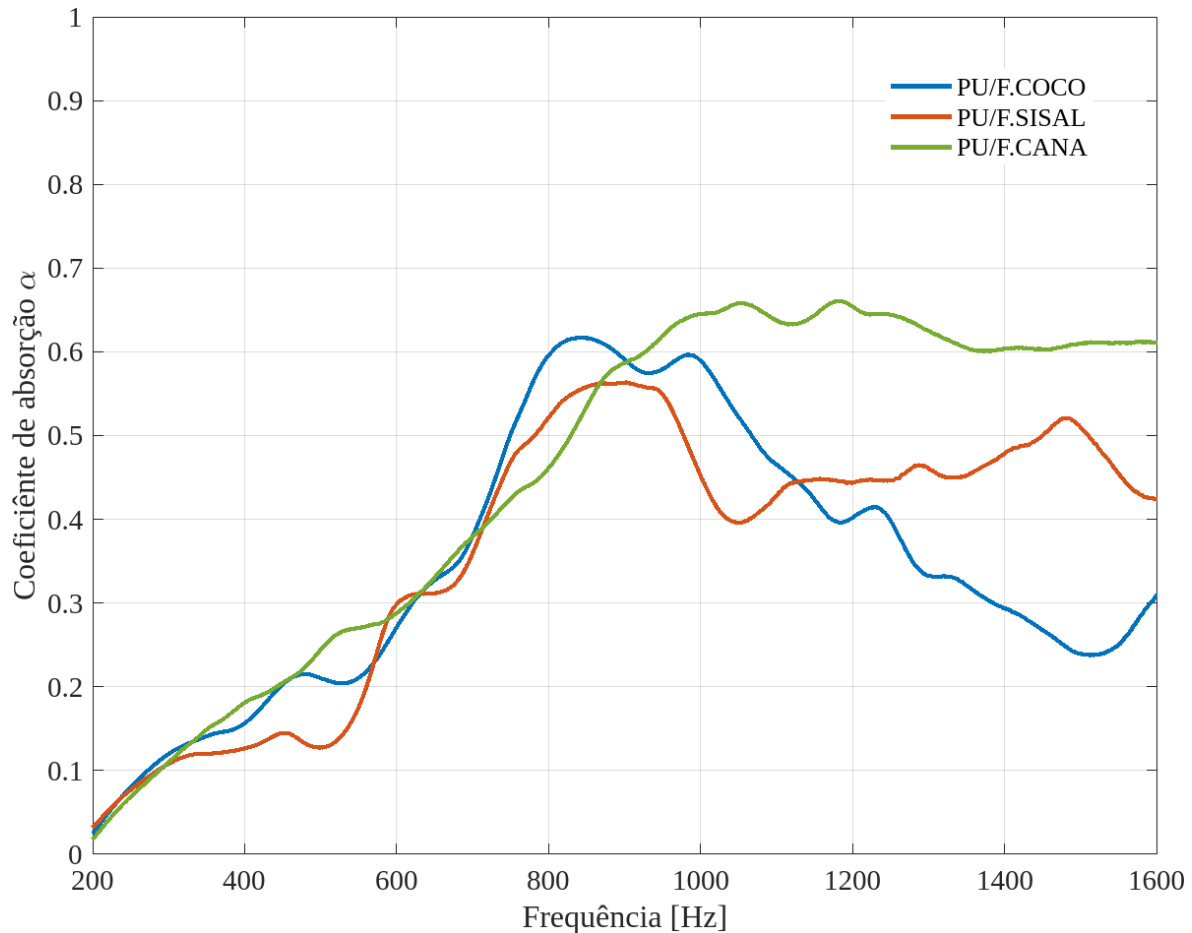
Após a aferição e a aquisição dos dados, foram feitas médias de todas as medições, objetivando enxergar com clareza os resultados. No Gráfico 21, a avaliação das amostras de fibra de cana-de-açúcar (PU/F.CANA) apresentou resultado superior comparado com as amostras de PU/fibra de coco e sisal, obtendo 0.65 na faixa de frequência de 1000 Hz. As amostras de fibra de coco apresentaram 0.7 α na frequência de 800 Hz e as de fibra de sisal com 0.58 α na frequência de 820 Hz.

Gráfico 21: Média das amostras com 40 alfinetes cada uma

Fonte: A autora, 2024.

Para as amostras sem alfinetes e sem plasticina na borda, também foi realizado o comparativo das médias em baixa frequência. No Gráfico 22, a medição das amostras sem plasticina na borda evidencia a média das amostras de PU/fibra cana-de-açúcar com mais faixas de absorção sonora, variando de 0.6 a 0.65, nas frequências de 900-1600 Hz. A média das amostras de PU/F. COCO apresentou o seu maior desempenho de absorção, de 0.64, nas faixas de frequências de 830-850 Hz, seguindo com variação e queda na absorção sonora.

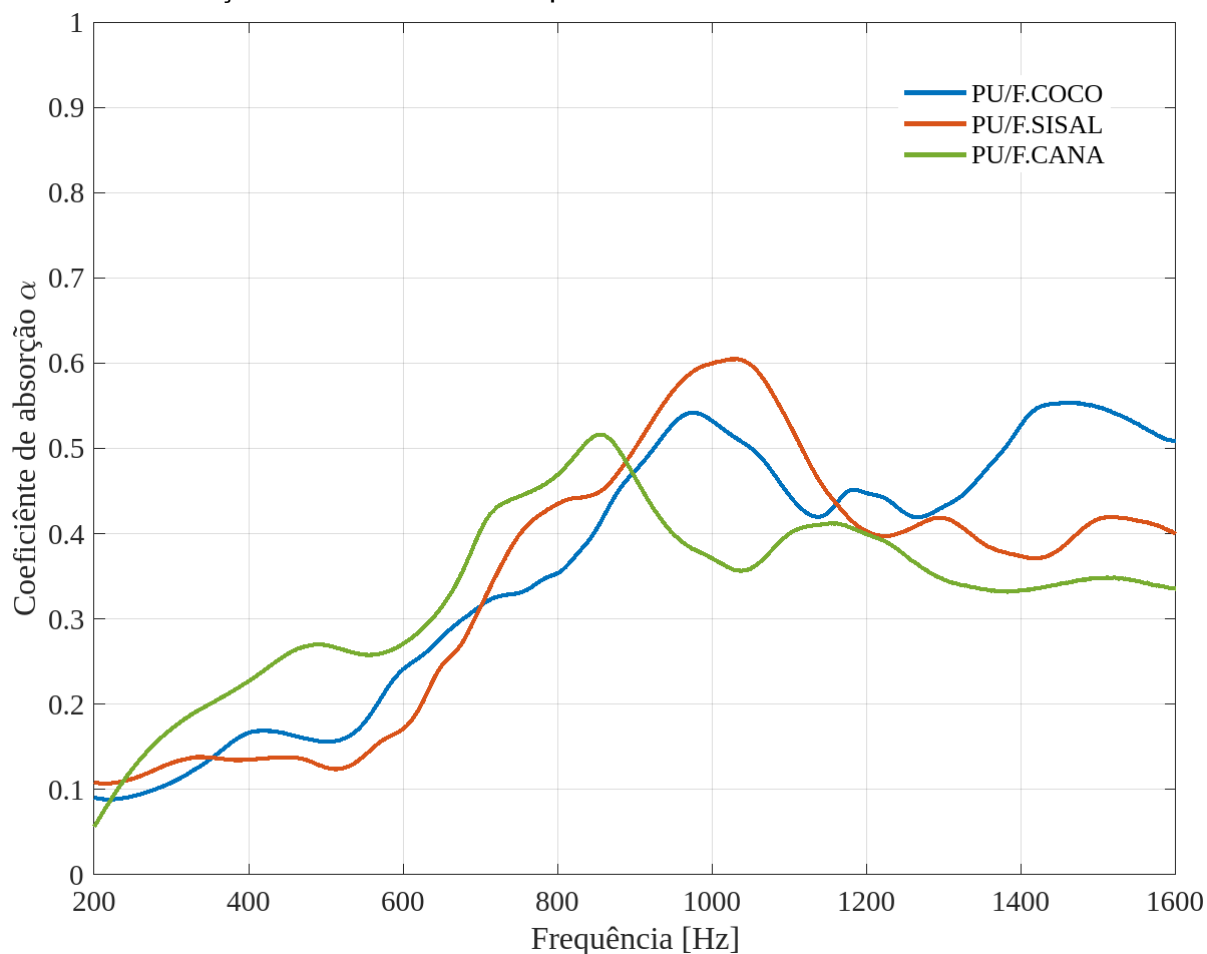
A média das amostras de PU/F. SISAL apontou o menor desempenho, se comparada com as outras fibras, nas faixas de frequências de 200 a 1130 Hz, obtendo a maior absorção sonora, de 0.55, nas frequências de 840-980 Hz. Entretanto, nas frequências de 1130 a 1600, os resultados de coeficiente de absorção ultrapassaram as amostras de PU/F. COCO, obtendo um maior pico de 0.53 na frequência 1500 Hz.

Gráfico 22: Avaliação das amostras sem alfinetes e sem plasticina nas bordas

Fonte: A autora, 2024.

As amostras avaliadas sem alfinetes e com plasticina (massa de modelar) nas bordas apresentaram um desempenho menor que a medição das amostras sem a plasticina. Nas análises, ficou entendido que a presença da massa de modelar pressiona os poros e o interstício das amostras, contribuindo para a redução da absorção sonora.

Dentre as espécimes avaliadas, a média das amostras PU/F.SISAL apresentou maior absorção sonora, de 0.6, nas frequências de 980-1200 Hz, seguindo-se redução da absorção sonora nas frequências seguintes. A média das amostras de PU/fibra de coco apresentou a maior absorção, de 0.5 na frequência 990Hz, seguindo com baixa absorção nas frequências seguintes. A média das amostras de PU/F.CANA teve a sua maior absorção, de 0.51, na frequência 840 Hz; nas frequências seguintes, apresentou queda no coeficiente de absorção, conforme o Gráfico 23.

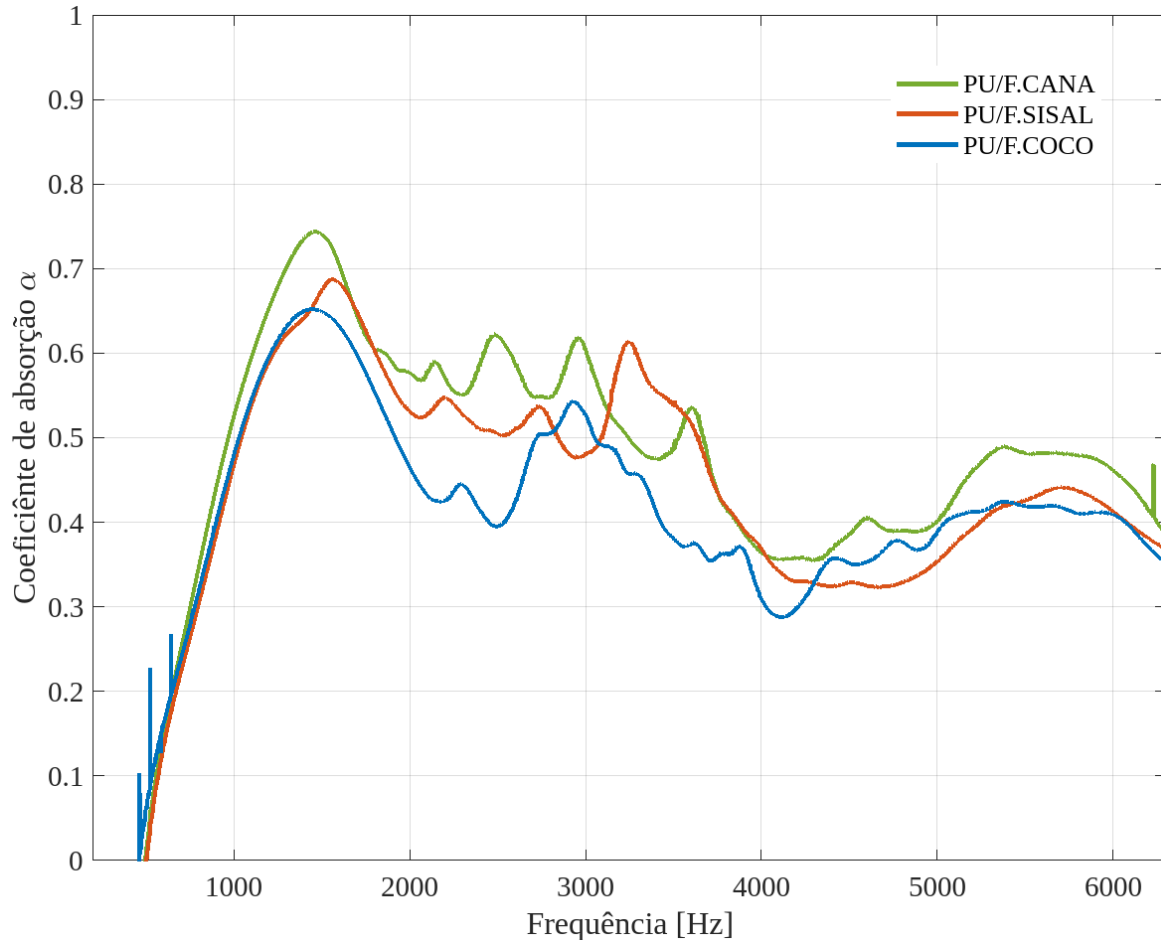
Gráfico 23: Avaliação das amostras com plasticina nas bordas

Fonte: A autora, 2024.

7.1.2 Faixas de frequências de 200 - 6400 Hz

As amostras avaliadas em alta frequência seguiram os mesmos procedimentos de medição das amostras mensuradas em baixa frequência; contudo, sem alfinetes e plasticina nas bordas. O Gráfico 24 apresenta as médias dos três tipos de amostras com PU (as mesmas amostras usadas nas medições de baixa frequência). Dentre as médias das amostras, a de PU/fibra de cana-de-açúcar se destacou com melhor desempenho de absorção sonora, de 0.75, na faixa de frequência de 1040 Hz.

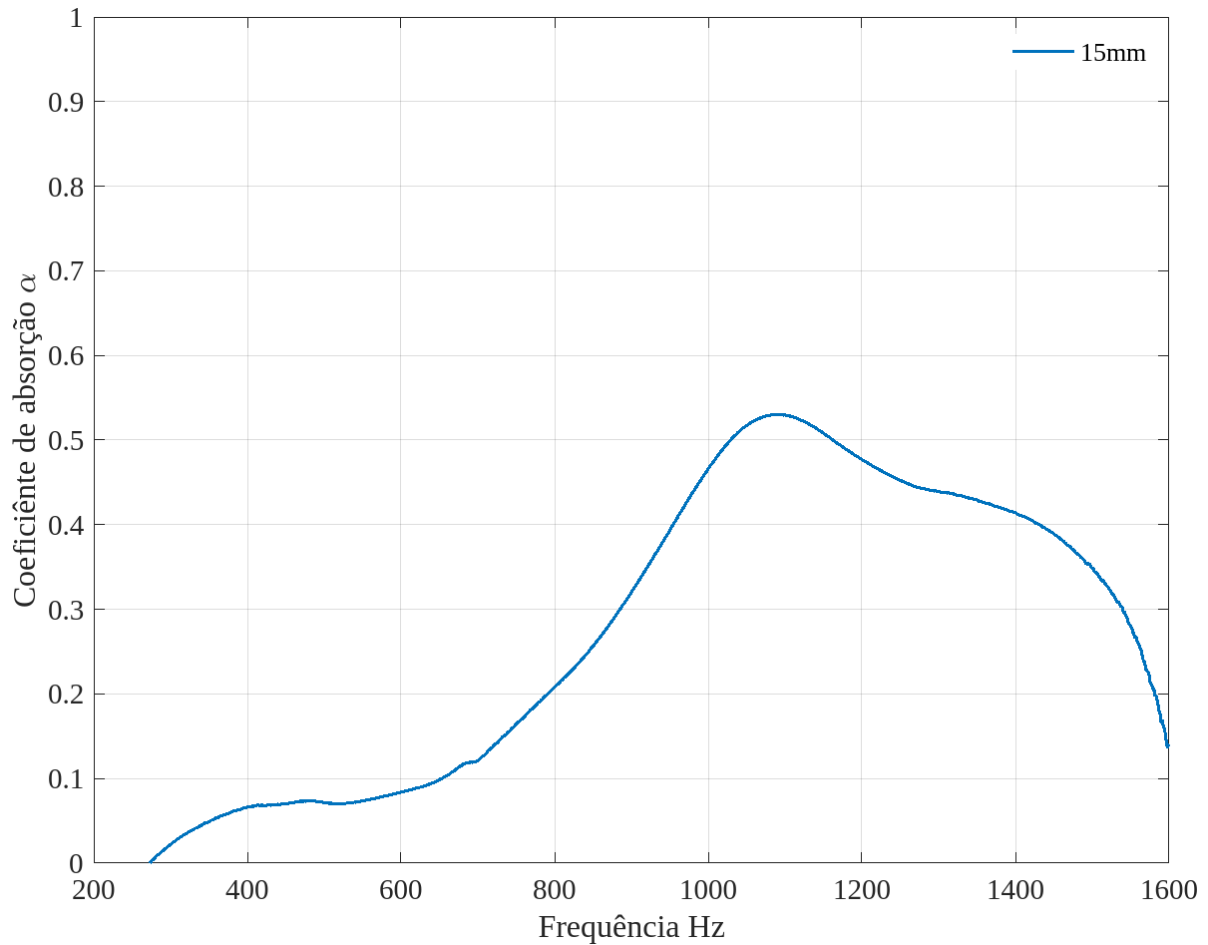
A amostra de PU/fibra de sisal obteve um desempenho um pouco abaixo, com 0.68 α , na frequência 1070 Hz. A amostra de PU/fibra de coco apresentou o menor coeficiente de absorção, de 0.65, nas frequências de 1400-1500 Hz; contudo, em todas as amostras, sobressaíram os coeficientes de absorção até 0.3 nas faixas de frequências que variam de 1000 a 6400 Hz.

Gráfico 24: Média das medições das amostras nas frequências de 200 – 6400 Hz

Fonte: A autora, 2024.

7.1.3 Medição somente da espuma PUCA

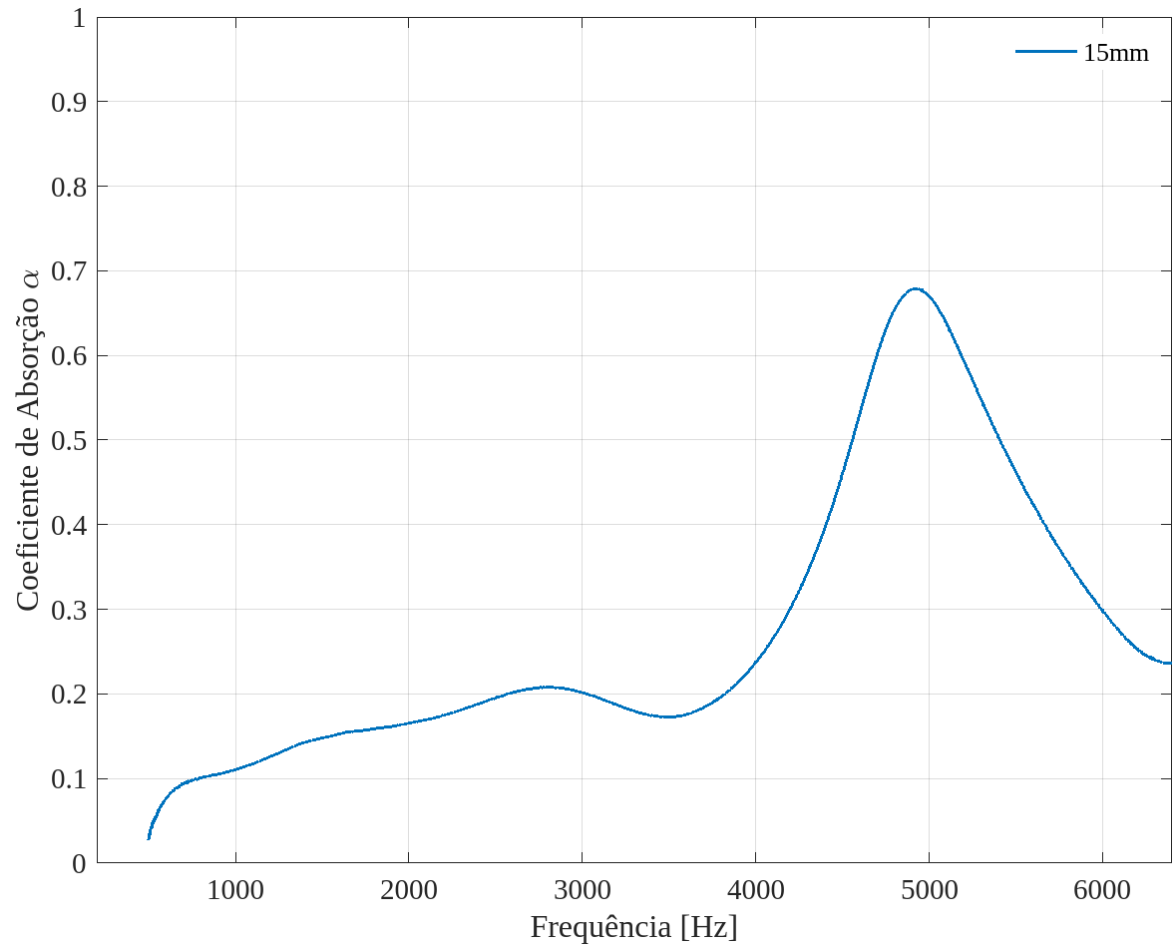
Para as amostras feitas somente com espuma de PUCA, foram efetuadas medições nas frequências de 100-1600 Hz e nas frequências de 400-6400. O Gráfico 25 mostra uma baixa absorção sonora, de 0.2, nas frequências de 290 a 800 Hz. Além disso, é possível observar o maior pico de absorção sonora na frequência 1090 Hz, seguindo com o decréscimo da absorção sonora até a frequência de 1600 Hz. A menor absorção sonora apresentada nas frequências varia de 200 – 800 Hz.

Gráfico 25: Amostras de espuma de PUCA mensurada nas frequências de 100-1600 Hz

Fonte: A autora, 2024.

No Gráfico 26, a amostra de espuma de espessura 15 mm foi medida nas frequências de 400-6400 Hz. É possível observar uma relevante absorção sonora em um único pico, na frequência de 4900 Hz, com absorção de 0,68, seguindo um decrescimento que vai até 6040 Hz.

Gráfico 26: Amostras de espuma de PUCA mensurada nas frequências de 400-6400 Hz



Fonte: A autora, 2024.

7.1 RESULTADOS DAS EQ. EMPÍRICAS (AC E DB) E MÉT. EXPERIMENTAL (EXP).

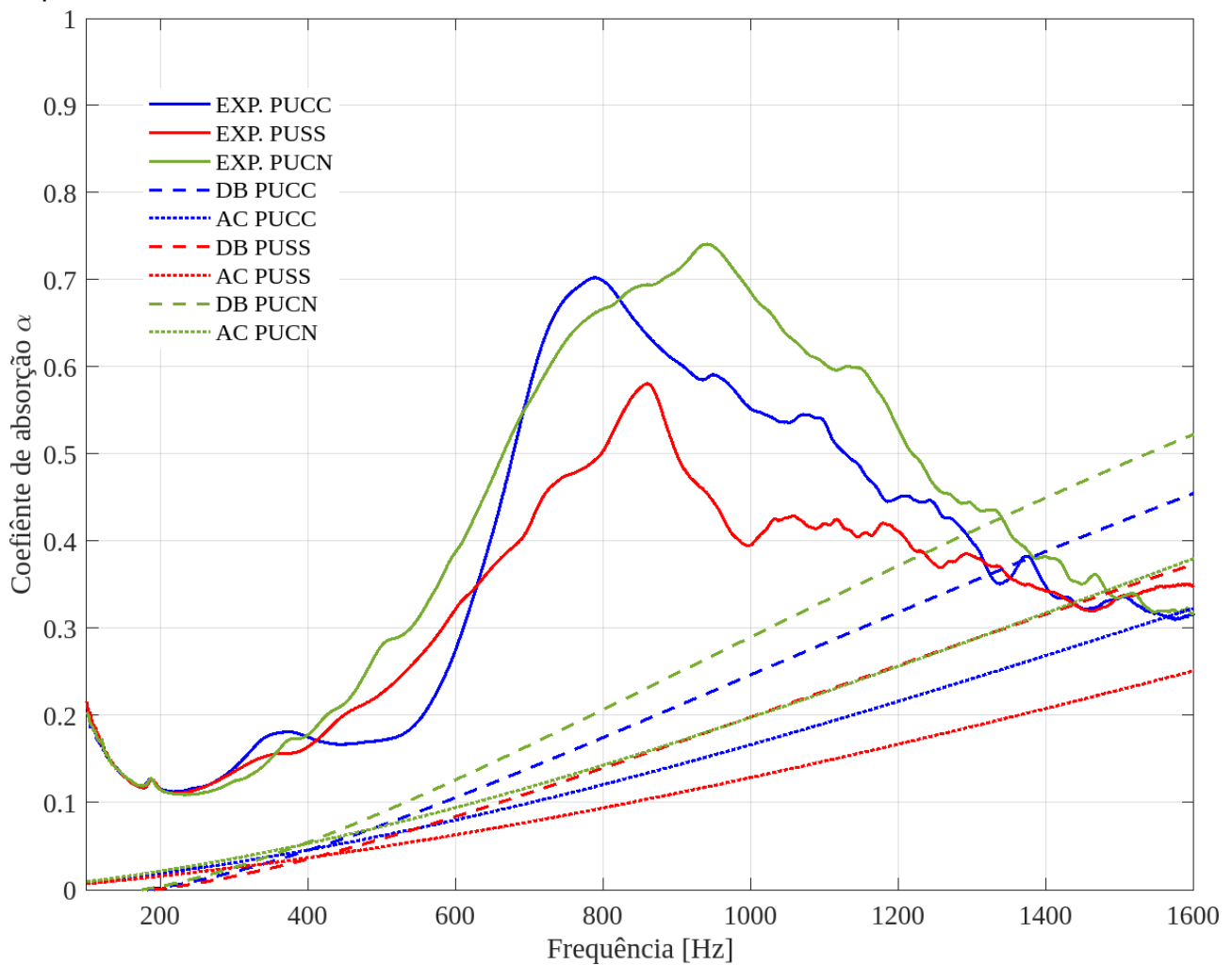
7.1.1 Faixa de frequência de 100 - 1600 Hz

Para avaliação das equações clássicas empíricas, foram inseridos os dados das medições dos experimentos realizados acima. O Gráfico 27 retrata as medições experimentais com alfinete e sem plasticina nas bordas comparadas com os métodos empíricos de Delany e Bazley (DB) e os métodos de Allard e Champoux (AC). Nos métodos experimentais e empíricos, as amostras de PUCN (amostras com fibra de cana-de-açúcar) obtiveram maiores resultados, acima de 0.6 nas frequências de 1000-1600 Hz. As mesmas amostras com os métodos empíricos apresentaram o coeficiente de absorção com valor inferior, aumentando o coeficiente de absorção de 0.1-0.52 nas faixas de frequências de 400-1600 Hz com as equações de AC (Allard e Champoux) e valores inferiores nas equações de DB (Delany e Bazley).

Vide o gráfico seguinte com as linhas cheias nas cores azul, vermelho e verde, com as amostras de PUCC (PU e fibra de coco), PUSS (PU e fibra de sisal), e PUCN (PU e fibra de cana-de-açúcar) respectivamente sendo medidas em método experimental. As linhas tracejadas azul, vermelha e verde, com as amostras de PUCC (PU e fibra de coco), PUSS (PU e fibra de sisal), e PUCN (PU e fibra de cana-de-açúcar) respectivamente foram analisadas conforme as equações empíricas de DB. As linhas pontilhadas nas cores azul, vermelha e verde, com as amostras de PUCC (PU e fibra de coco), PUSS (PU e fibra de sisal), e PUCN (PU e fibra de cana-de-açúcar) respectivamente, foram analisadas com as equações empíricas de AC.

Conforme o Gráfico 27, as avaliações das amostras de PUCN se destacaram, apresentando valores superiores aos das outras amostras de avaliações. No método experimental, a amostra de PUCN apresentou o coeficiente de absorção de 0.72 na frequência 990 Hz, nos métodos empíricos de AC e DB. Em todas as avaliações, as amostras apresentaram subida constante, diferenciando-se das medições no método experimental. A amostra de PUCN no método DB se destaca com maior crescimento na frequência 1600 Hz. As amostras medidas no método de AC tiveram os menores valores. As medições foram realizadas com alfinetes nas amostras.

Gráfico 27: Comparação dos dados experimentais com alfinetes com as equações empíricas

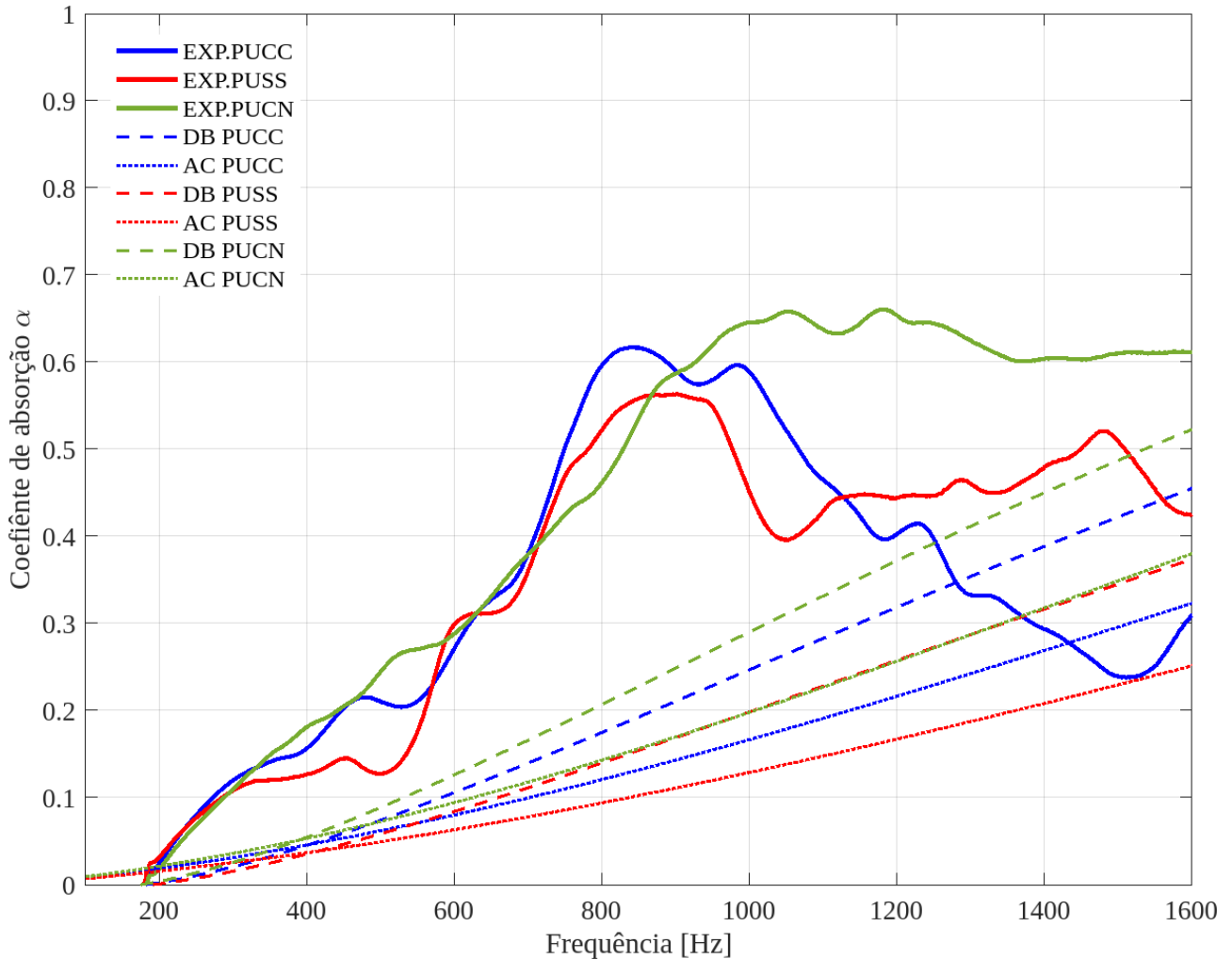


Fonte: A autora, 2024.

No Gráfico 28, as avaliações experimentais apresentaram maiores valores nas frequências de 600-1200 Hz se comparadas com os métodos empíricos de AC e DB. As amostras avaliadas sem plasticina nas bordas apresentaram maiores valores com o método experimental em todas as faixas de frequências. Relembrando, tal como foi citado no início deste capítulo, a legenda do gráfico com as linhas cheias nas cores azul, vermelho e verde, com as amostras de PUCC (PU e fibra de coco), PUSS (PU e fibra de sisal), e PUCN (PU e fibra de cana-de-açúcar), respectivamente, mostram medidas em método experimental. As linhas tracejadas azul, vermelha e verde, com as amostras de PUCC (PU e fibra de coco), PUSS (PU e fibra de sisal), e PUCN (PU e fibra de cana-de-açúcar), respectivamente, foram analisadas conforme as equações empíricas de DB. As linhas pontilhadas nas cores azul, vermelha e verde, com as amostras de PUCC (PU e fibra de coco), PUSS (PU e fibra de

sisal), e PUCN (PU e fibra de cana-de-açúcar), respectivamente, foram analisadas com as equações empíricas de AC.

Gráfico 28: Comparação dos dados experimentais sem alfinetes e sem plasticina com as equações empíricas

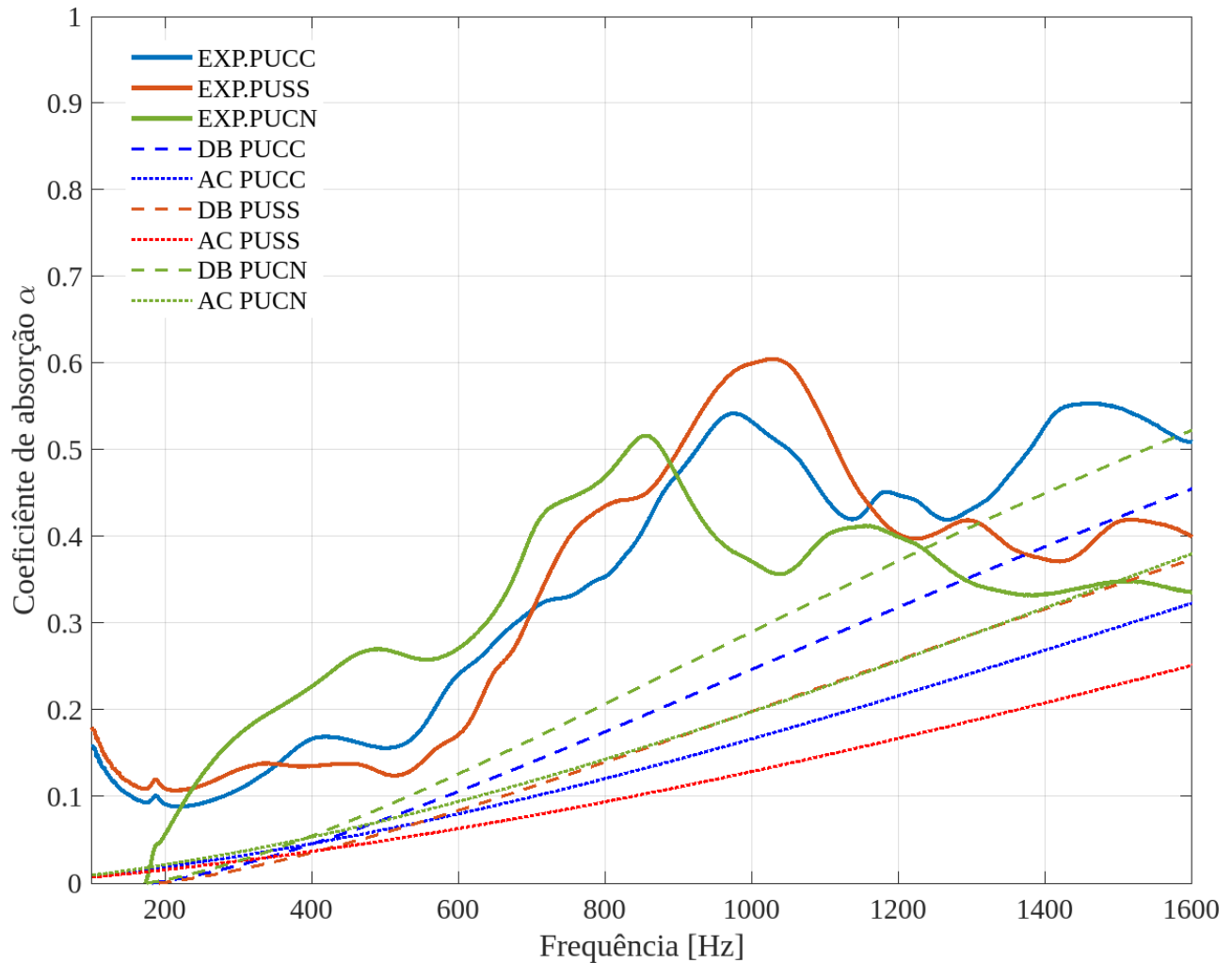


Fonte: A autora, 2024.

Novamente, a PUCN se destacou com maior coeficiente de absorção de 900 a 1600 Hz dentre as amostras, apresentando uma constância no coeficiente de absorção sonora nas frequências de 910-1600 Hz. A amostra de PUCC apresentou seu maior pico, de 0.61, na frequência de 820 Hz, seguindo com decrescente resultado, enquanto que a amostra de PUSS apresentou maior resultado, de 0.57, nas frequências de 830-880 Hz. Todas as amostras avaliadas nos métodos de AC e DB apresentaram os mesmos comportamentos das avaliações dos gráficos 27-28, com crescimento constante. No Gráfico 29, as amostras medidas com plasticina e sem alfinetes apresentaram valores próximos daqueles das

análises dos métodos empíricos nas faixas de frequências (que variam de 1200 a 1600 Hz). Contudo, nas faixas de frequência anteriores, de 200-1200 Hz, os resultados se apresentaram com valores maiores no coeficiente de absorção se comparados com os métodos empíricos.

Gráfico 29: Comparação dos dados experimentais com plasticina e com as equações empíricas



Fonte: A autora, 2024.

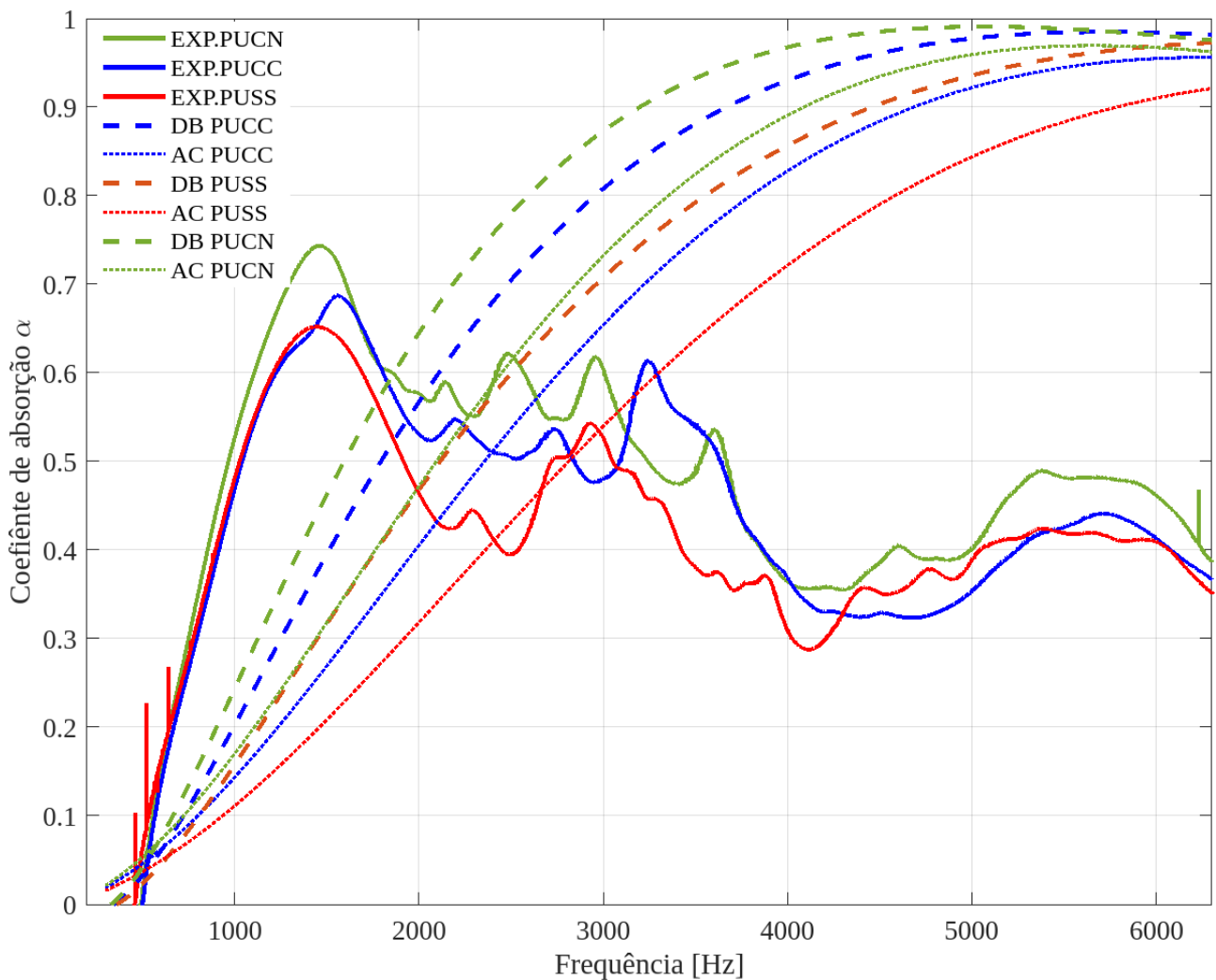
7.1.2 Faixa de frequência de 200 - 6400 Hz

Na comparação das medições experimentais e métodos empíricos, as amostras não foram avaliadas com alfinete e nem com massa de modelar nas bordas; o experimento foi realizado com as mesmas amostras, com diâmetro de 28 mm. O Gráfico 30 destaca os resultados com as amostras de PUCN (amostras com fibra de cana-de-açúcar), atingindo o maior valor de coeficiente de absorção, acima de 0.9, nas frequências de 4000 – 6400 nas equações empíricas de DB (Delany e Bazley) e AC (Allard e Champoux). Assim como nas análises anteriores, os resultados das amostras nas equações empíricas de DB (linha tracejada) sempre ficaram com coeficiente de absorção acima das equações empíricas de AC (linha pontilhada).

As amostras de PUCC e PUSS (amostras com fibra de coco e sisal respectivamente) conforme as equações de DB e AC, nas linhas tracejadas e pontilhadas respectivamente, ficaram abaixo das amostras de PUCN. Os resultados de DB e AC sobressaíram do método experimental nas faixas de frequência de 1990 a 6400 Hz; contudo, nas frequências iniciais, de 300 a 1989 Hz, o método experimental se destaca.

Os dados no método experimental apresentaram o maior valor de absorção de 0.74 na frequência de 1500 Hz com as amostras de PUCN. Além disso, os resultados das medições experimentais das amostras de PUCC apresentaram o maior pico de absorção sonora, de 0.68, na frequência 1600Hz. E a amostra de PUSS teve o seu maior resultado de absorção sonora, 0.64 na frequência 1500Hz. Todas as amostras no método experimental ficaram com coeficiente de absorção acima de 0.29 nas frequências de 600 a 6400 Hz. Vide o Gráfico 30.

Gráfico 30: Comparação dos dados experimentais e eq. empíricas nas frequências 400/6400 Hz



Fonte: A autora, 2024.

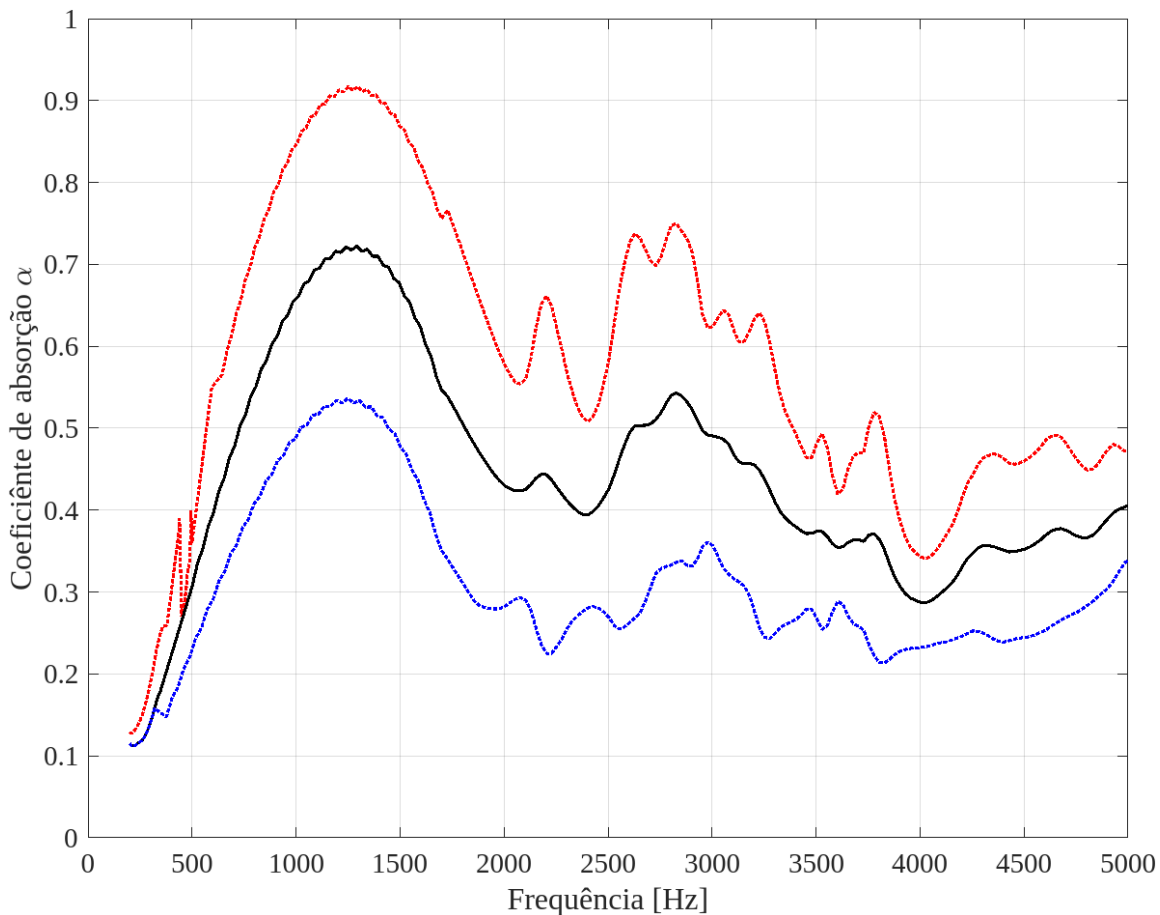
7.2 RESULTADOS INTERPOLADOS

Para explicar as avaliações que foram feitas em dois equipamentos diferentes, se fez necessário interpolar os resultados das frequências de 100-1600 Hz a 400-6000 Hz para um único gráfico nas frequências de 100-5000 Hz. Todos os gráficos apresentam três linhas, sendo uma linha sólida preta representando a média da medição, uma linha pontilhada vermelha representando o desvio padrão para + e uma linha pontilhada azul representando o desvio padrão para -. Tal como mencionado no Cap. 2.1.9, os poros tendem a sofrer vibração com os efeitos de ressonância nos poros. Os gráficos seguintes permitem observar a média e o desvio padrão de cada tipo de amostra.

7.2.1 Interpolação das amostras de fibra de PUCC

A interpolação das amostras de PUCC apresentou a média do coeficiente de absorção igual a 0.71, sendo o maior pico na frequência de 1250 Hz, seguindo com picos menores de absorção de 0.44, 0.5, 0.52, nas frequências de 2200, 2560, 2580 Hz respectivamente, conforme Gráfico 31. As sequências de picos a partir da frequência 2000 até 5000 Hz são resultantes das medições realizadas sem alfinetes para o controle da ressonância nos poros da face espumosa das amostras.

Gráfico 31: Interpolação dos resultados das amostras de PUCC nas frequências de 100/5000 Hz

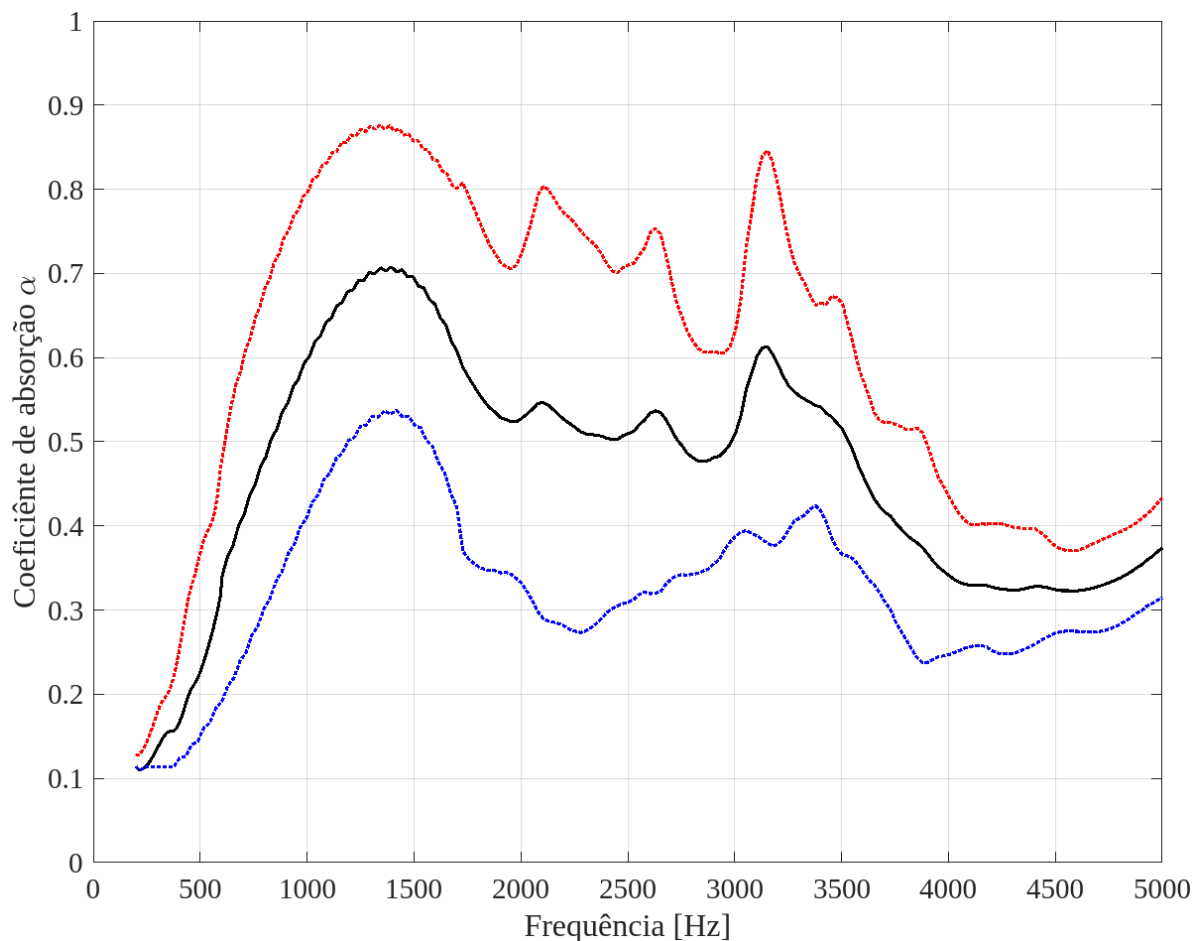


Fonte: A autora, 2024.

7.2.2 Interpolação das amostras de PUSS

A interpolação das amostras de PUSS apresentou menos picos em comparação as medições de PUCC, sendo o coeficiente de absorção de 0.7 o maior pico nas frequências de 1400 Hz, seguindo com picos menores de absorção de 0.55, 0.519 e 0.61 nas frequências de 2100, 2565, 3200 Hz, respectivamente (vide o Gráfico 32). Além disso, os resultados de sisal/PUCA decrescem a partir da frequência 3220Hz e, na sequência, o decrescimento a partir da frequência 3225 Hz.

Gráfico 32: Interpolação dos resultados das amostras de PUSS nas frequências de 100/5000 Hz

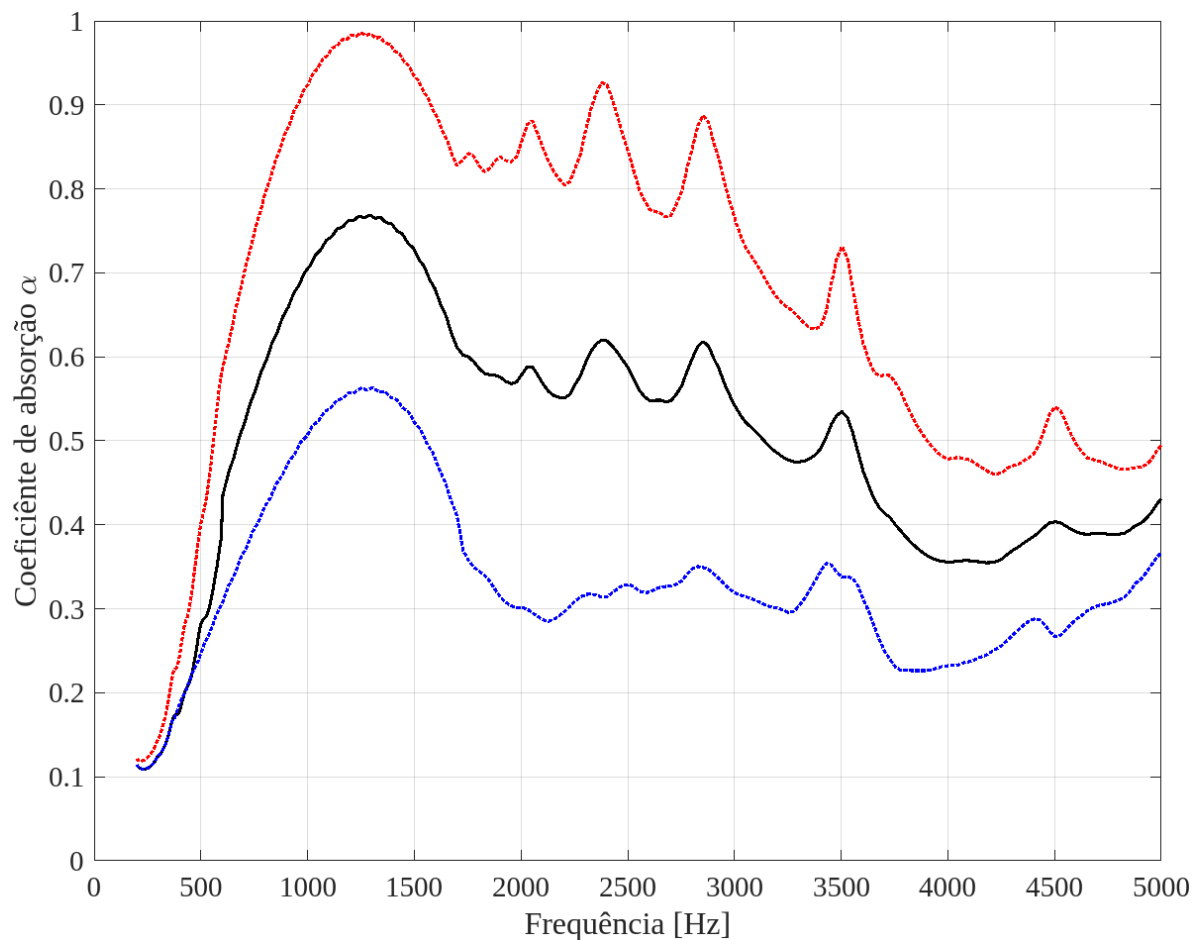


Fonte: A autora, 2024.

7.2.3 Interpolação das amostras de PUCN.

A interpolação das amostras de PUCN apresentou maior resultado em relação às duas medições anteriores, com o pico do coeficiente de absorção de 0.76, na frequência de 1250 Hz, seguindo com mais três picos expressivos de 0.611, 0.61 e 0.52 nas frequências de 2400, 2580, 3500 Hz, respectivamente (vide o Gráfico 33). As amostras de PUCN apresentaram os melhores resultados com espessura total de 15 mm nesta avaliação, comparado com as amostras de PUCC e PUSS.

Gráfico 33: Interpolação dos resultados de cana/PUCA nas frequências de 100/5000 Hz

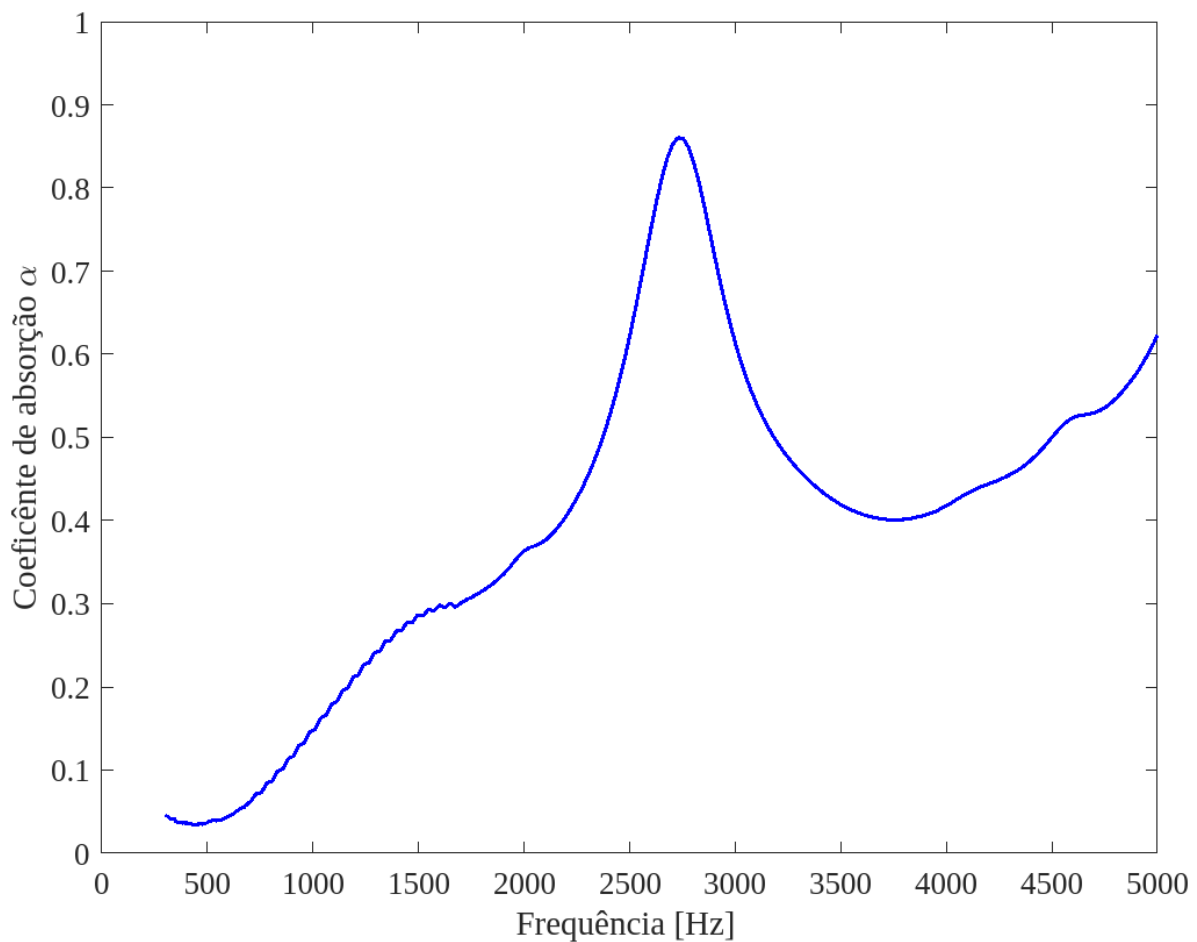


Fonte: A autora, 2024.

7.2.4 Interpolação das amostras de espuma espessura 15 mm

As amostras somente de espuma com espessura de 15 mm foram analisadas em ambos os tubos de impedância nas frequências de 100 a 6000 Hz. A escolha da medição desta amostra foi realizada em razão da sua efetividade na absorção sonora ser superior em relação as amostras de espuma de espessura 5 mm e 10 mm. O Gráfico 34 apresenta a medição interpolada das amostras medidas nos dois tubos de impedância; com isso, foi feita uma interpolação dos resultados das medições. O resultado apresentou maior absorção nas frequências de 2750 Hz com o coeficiente de absorção de 0.86 e acima de 5000 Hz com coeficiente de absorção de 0.61. Nas frequências de 1000 Hz, a absorção sonora foi baixa, apresentando o coeficiente de absorção de 0.14.

Gráfico 34: Interpolação dos resultados da espuma de PUCA nas frequências de 100/5000 Hz



Fonte: A autora, 2024.

7.3 APLICAÇÃO DO MATERIAL

Recomenda-se a aplicação do material produzido nesta tese em superfície de ambientes em que a frequência sonora incidente fique na faixa de frequência da voz humana (500-2000Hz) para que haja efetividade na absorção sonora.

Além disso, indica-se a aplicação do material somente após o tratamento antimofo e antichama para evitar possíveis acidentes, sendo necessário um acabamento adequado para o uso; deve-se revestir de maneira a não perder as propriedades. Adicionalmente, se faz necessário um projeto de acústica de sala para alocar, nas paredes e no teto, o material mais adequado para a absorção sonora.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas alternativas de compósitos eco amigáveis visando o tratamento acústico em superfícies. Para atender os objetivos, foram realizados experimentos para a determinação das propriedades acústicas, e, além disso, para analisar o seu ciclo de vida energético para mitigar os impactos ambientais causados pelo material após o fim da sua vida útil.

Para a avaliação acústica das amostras de fibras naturais de coco, sisal e cana-de-açúcar com uma camada de poliuretano, foi realizado o coeficiente de absorção sonora com métodos experimentais comparados com as equações empíricas de Delany e Bazley e as equações de Champoux e Allard. Os métodos experimentais executados tiveram base na ASTM 1050 para medição em tubo de impedância; para o método de resistividade ao fluxo, foi necessário seguir as orientações dos métodos de Ingard e Dear e métodos de Bies e Hansen. O método de impedância acústica avaliou amostras nas faixas de frequência de 100 à 6000 Hz, com medição em dois distintos tubos de impedância. O método de resistividade ao fluxo com base nos autores mencionados foi ajustado conforme as disponibilidades dos equipamentos existentes no laboratório. Ambos os métodos analisaram as amostras que foram produzidas de espessura de 15 mm.

As características das amostras apresentam-se promissoras, pois a sua espessura de 15 mm não ocupa um espaço significativo dentro de um volume habitável, podendo ser usados em projetos destinados à construção civil. O material indicado para essa finalidade é a amostras de PUCN que apresentou a absorção sonora de 0.75 na faixa de frequência de 1100 Hz. O material pode facilmente se enquadrar em ambientes em que o som da voz humana deverá ser absorvido.

As amostras medidas nos métodos envolvidos de resistividade ao fluxo e impedância acústica feitos em tubo de impedância foram criteriosamente medidas em câmara com vedação acústica para não ter inconsistência nos resultados. Além do mais, normas e técnicas clássicas foram aplicadas por apresentar critérios confiáveis para as medições.

Ao estabelecer as medições, realizando a propagação sonora na face espumosa da amostra, foi observado que os resultados apresentavam inúmeros picos, sendo característicos em material poroso/espumoso, devido a sua estrutura. Para os picos causados pela ressonância, o controle da vibração se fez indispensável com o emprego da técnica de T. Iwase *et al.* (1980), que usa aplicação de alfinetes atravessando a amostra para controlar a vibração da espuma. Essa técnica contribuiu para diminuição do fenômeno da ressonância na parte espumosa da amostra. Além disso, foi observado que a parte fibrosa não foi afetada com a presença dos alfinetes. Entretanto, é necessário observar que quanto maior o número de alfinetes aplicados mais rígida a amostras ficará. A quantidade de agulhas colocadas nas amostras demonstram ser o limite para estes experimentos.

As principais dificuldades das medições estavam relacionadas a falta de equipamentos específicos, o que tornou as medições exaustivas em diversos aspectos. A ausência de equipamentos para o método de resistividade ao fluxo com pressão sonora compeliu ao uso de métodos e técnicas clássicas que demandaram mais tempo de testes e estudos. Juntamente a isso, havia falta de instrumentos de medição de porosidade e tortuosidade, que também implicam nas propriedades do material, pois são parâmetros que possibilitam o uso de modelos matemáticos mais atualizados e completos. Além disso, para amostras com características naturais, é necessária a aplicação de testes de inflamabilidade, tratamentos ignífugos e antimofos com produtos adequados para materiais fibrosos naturais sem que comprometa as suas características acústicas e naturais.

Outro fato crucial está ligado a parte espumosa da amostra que possui um grau de dureza quimicamente natural, pois o poliálcool de cana-de-açúcar com isocianato, ao elaborar o compósito sua cadeia química de ligação, produz um grau de dureza superior a espumas convencionais, fazendo com que a espuma se deforme facilmente. Contudo, a aplicação de aditivos para modificar a sua estrutura possibilita uma maciez ou densidade conforme a necessidade de usabilidade.

O propósito de investigar um material de matriz natural com espessura mais fina vai além das suas características de absorção acústica; o esclarecimento da sua fabricação é crucial não apenas para se ter um material absorvente, mas também para compreender toda a energia que será consumida na fabricação. Esse entendimento da fabricação impacta diretamente o meio ambiente, pois toda a energia embutida consumida gera algum efeito nocivo a natureza, logo, ao mitigar ou buscar soluções de origem natural, essas implicações são reduzidas. Com isso, ao entender a funcionalidade do material, como é produzido e a análise do ciclo

de energia embutida na fabricação, fica notório compreender os impactos que podem ser reduzidos ao serem descartados à natureza.

Desta forma, esta tese objetivou produzir materiais destinados a absorção acústica de matriz natural, com espessura mais fina, na tentativa de prover o menor impacto ao meio ambiente.

Sugestões para trabalhos futuros

Medição das amostras de diâmetro 28 mm com alfinetes;

Fazer teste de flamabilidade;

Aplicar tratamento ignifugante e antimoho;

Explorar novos materiais;

Executar medições de porosidade e tortuosidade;

Aplicar o material em projetos de salas;

Caracterização inversa;

Simular a absorção acústica dos materiais em ambientes de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIR KHAN; A. AZIM; A. RAHMAN. An examination of cutting-edge developments in Bamboo-PLA composite research: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 188, 2023.
- ALLARD, J.; CHAMPOUX, Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 91, n. 6, p. 3346–3353, 1992.
- ALMEIDA, J. **ELASTICIDADE LINEAR CLÁSSICA VI. RELAÇÕES CONSTITUTIVAS**. Curitiba: [s.n.].
- ALVAREZ, RAMIREZ. R. *et al.* Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels. **Construction and building materials**, v. 37, p. 425–431, dez. 2012.
- ARNO, E.; RAMON, K.; ALVARENGA, C. **Embrapa - Milho e Sorgo, Cultivo do Milho**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/Cult...>>.
- ASTM. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 04, n. Reapproved 2009, 2010.
- ____. ASTM C522-03(2016) Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials (ASTM International, West Conshohocken, 2016). v. 03, n. Reapproved 2009, p. 1–5, 2012.
- ____. ASTM D883: Standard Terminology Relating to Plastics. 2020.
- ASTM D 635. **ASTM D 635 - Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position**¹, 2003.
- ASTM D883-22. **D883 Standard Terminology Relating to Plastics**, 2022.
- BAI, C. *et al.* Porosity, mechanical and insulating properties of geopolymer foams using vegetable oil as the stabilizing agent. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 38, n. 2, p. 799–805, 2018.
- BAI, P. *et al.* Sound absorption performance of the acoustic absorber fabricated by compression and microperforation of the porous metal. **Materials and Design**, v. 167, n. 1, p. 107637, 2019.
- BANSOD, P. V.; MOHANTY, A. R. Inverse acoustical characterization of natural jute sound absorbing material by the particle swarm optimization method. **Applied Acoustics**, v. 112, p. 41–52, 2016.
- BARRON, R. F. . **Industrial noise control and acoustics**. [s.l.] Marcel Dekker, 2003.
- BARROS, M. A. L. ;; RAMOS, G. A. Estatística Mamona. **Embrapa**, 2022.
- BASF SA. **Badische Anilin & Soda Fabrik**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.basf.com>>.
- BEER, F. P. **Mecânica dos materiais (5a. ed.)**. [s.l.] Grupo A - AMGH, 2000.

- BEKKER, P. C. F. A life-cycle approach in building. **Building and Environment**, v. 17, n. 1, p. 55–61, 1982.
- BERANEK, L. L. Acoustic Impedance of Porous Materials. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 13, n. 3, p. 248–260, 1942.
- BIES, D. A.; HANSEN, C. H. Flow resistance information for acoustical design. **Applied Acoustics**, v. 13, n. 5, p. 357–391, 1980.
- BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering Noise Control**. First ed. New York: Taylor & Francis, 1988.
- BIOLÃ. **Guia sobre Lã de Rocha-Biolã**. [s.l: s.n.].
- BIOT, M. A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 28, n. 2, p. 179–191, 1956.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 3. ed. São Paulo: [s.n.].
- BITTENCOURT, C. **Avaliação do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes naturais para baixa frequência com três métodos**. Curitiba: Pontifícia Universidade Católica do Paraná, jul. 2018.
- BODÉN, H.; ÅBOM, M.; BOD, H. Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts. v. 541, n. 1986, 1998.
- BRAINER, P. **Coco: Produção e mercado**. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1043/1/2021_CDS_206.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2024.
- BROWN, R. L.; BOLT, R. H. The Measurement of Flow Resistance of Porous Acoustic Materials. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 13, n. 4, p. 337–344, 1942.
- BUCCIARELLI, F.; Malfense Fierro, G. P.; MEO, M. A multilayer microperforated panel prototype for broadband sound absorption at low frequencies. **Applied Acoustics**, v. 146, p. 134–144, 1 mar. 2019.
- BUCCIARELLI, F.; MEO, M. Broadening sound absorption coefficient with hybrid resonances. **Applied Acoustics**, v. 160, 1 mar. 2020.
- CARSLAW, S. H.; JAEGER, C. J. Conduction of heat in solids. **Minerals, Metals and Materials Series**, n. 9783319651293, p. 158–188, 2016.
- CARVALHO, H. *et al.* Application of Life Cycle Engineering Approach to Assess the Pertinence of Using Natural Fibers in Composites - The Rocker Case Study. **Procedia CIRP**, v. 48, p. 364–369, 2016.
- ÇELEBI, S.; KÜÇÜK, H. Acoustic properties of tea-leaf fiber mixed polyurethane composites. **Cellular Polymers**, v. 31, n. 5, p. 241–255, 2012.

- CENDON, F. V.; JORGE, R. M. M.; MATHIAS, A. L. Uso de bagaço de cana-de-açúcar como isolante térmico em aquecedor solar de água. *Em: Educação Ambiental e Cidadania: Pesquisa e Práticas Contemporâneas - Volume 1*. [s.l.] Editora Científica Digital, 2021. p. 456–465.
- CHAMPOUX, Y.; ALLARD, J.-F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *J. appl. Phys.*, v. 70, p. 1975–1979, 1991.
- CHAMPOUX, Y.; STINSON, M. R.; DAIGLE, G. A. . Air-based system for the measurement of porosity. *J. A. S. A.*, v. 89, n. February 1991, p. 910–916, 1990.
- CHEN, S.; JIANG, Y. The Acoustic Property Study of Polyurethane Foam With Addition of Bamboo Leaves Particles. *Polymers and Polymer Composites*, v. 16, n. 2, p. 101–113, 2016.
- CHRISTAN, G. DE. **Determinação da resistividade ao fluxo de materiais absorventes com o método de Ingard e Dear com uso do tubo de impedância.** ENGENHARIA MECÂNICA – ESCOLA POLITÉCNICA Curitiba PUC-PR, , jun. 2018.
- CHUNG, J. Y.; BLASER, D. A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 68, n. 3, p. 907–913, 1980a.
- CKC. **CKC-2020 (Catálogo e FT)_120418 - Fibras Naturais**, 2020.
- CONTRERAS, J. *et al.* Development of eco-friendly polyurethane foams based on *Lesquerella fendleri* (A. Grey) oil-based polyol. *European Polymer Journal*, v. 128, p. 109606, 2020.
- DELANY, M. E.; BAZLEY, E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, v. 3, n. 2, p. 105–116, 1970.
- DIGIKEY. **Como proteger equipamentos eletrônicos sensíveis contra choque, vibração e temperatura.** Disponível em: <<https://www.digikey.pt/pt/articles/how-to-protect-sensitive-electronic-equipment>>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- DONG, C. *et al.* Sound absorption performance of a micro perforated sandwich panel with honeycomb-hierarchical pore structure core. *Applied Acoustics*, v. 203, 28 fev. 2023.
- DOUTRES, O. *et al.* Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. *Applied Acoustics*, v. 71, n. 6, p. 506–509, 2010.
- DUPONT, T.; LECLAIRE, P.; PANNETON, R. Acoustic methods for measuring the porosities of porous materials incorporating dead-end pores. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 133, n. 4, p. 2136–2145, 2014.
- EHSAN SAMAEI, S. *et al.* Optimization and modeling of the sound absorption behavior of polyurethane composite foams reinforced with kenaf fiber. *Applied Acoustics*, v. 202, 1 jan. 2023.
- EMBRAPA. Mamona. *Em: Embrapa*. [s.l: s.n.]. .

- ERSOY, S.; KÜÇÜK, H. Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 1, p. 215–220, 2009.
- FATIMA, S.; MOHANTY, A. R. Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. **Applied Acoustics**, v. 72, n. 2–3, p. 108–114, 2011.
- FAY, R.; TRELOAR, G.; IYER-RANIGA, U. Life-cycle energy analysis of buildings: A case study. **Building Research and Information**, v. 28, n. 1, p. 31–41, 2000a.
- FELLAH, Z. E. A. *et al.* Measuring permeability of porous materials at low frequency range via acoustic transmitted waves. **Review of Scientific Instruments**, v. 78, n. 11, 2007.
- FILHO, I. A. P.; BORGHI, E. Milho safra 2022_2023. - Portal Embrapa. **EMBRAPA**, 2022.
- FONSECA DE LIMA, K.; BARBIERI, N.; BARBIERI, R. Alternative method for acoustical characterization of absorbent materials based on the assessment of the acoustical efficiency of dissipative silencers. **Noise Control Engineering Journal**, v. 64, n. 2, p. 195–207, 2016.
- GAMA, N.; FERREIRA, A.; BARROS-TIMMONS, A. 3D printed cork/polyurethane composite foams. **Materials and Design**, v. 179, p. 107905, 2019.
- GERGES, S. N. Y. **Ruido- Fundamentos e Controle**. 2º ed. Florianópolis- SC - Brasil: [s.n.].
- GIUSEPPE, E. DI *et al.* Reliability evaluation of automated analysis, 2D scanner, and micro-tomography methods for measuring fiber dimensions in polymer-lignocellulosic fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 90, p. 320–329, 2016.
- GLÉ, P. *et al.* The effect of particle shape and size distribution on the acoustical properties of mixtures of hemp particles. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 6, p. 4698–4709, dez. 2013.
- GLÉ, P.; GOURDON, E.; ARNAUD, L. Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. **Applied Acoustics**, v. 72, n. 5, p. 249–259, 2010a.
- GÓMEZ ESCOBAR, V. *et al.* Initial conditioning of used cigarette filters for their recycling as acoustical absorber materials. **Materials**, v. 14, n. 15, 1 ago. 2021.
- GOMEZ, T. S. *et al.* Figue fibres as a sustainable material for thermoacoustic conditioning. **Applied Acoustics**, v. 164, p. 107240, 2020.
- GROS, E.; PANNETON, R. A missing mass method to measure the open porosity of porous solids. v. 32, n. 3, p. 20–21, 2004.
- GWON, J. G.; KIM, S. K.; KIM, J. H. Sound absorption behavior of flexible polyurethane foams with distinct cellular structures. **Quaternary International**, v. 387, p. 132, 2015.
- HOSSEINI FOULADI, M. *et al.* Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 3, p. 241–249, 2009.

- HUANG, X. *et al.* High bio-content polyurethane (PU) foam made from bio-polyol and cellulose nanocrystals (CNCs) via microwave liquefaction. **Materials and Design**, v. 138, p. 11–20, 2018.
- HURRELL, A. I.; HOROSHENKOV, K. V.; PELEGRINIS, M. T. The accuracy of some models for the airflow resistivity of nonwoven materials. **Applied Acoustics**, v. 130, p. 230–237, 15 jan. 2018.
- IANNACE, G.; CIABURRO, G.; TREMATERRA, A. Modelling sound absorption properties of broom fibers using artificial neural networks. **Applied Acoustics**, v. 163, p. 107239, 2020.
- INGARD, K. U.; DEAR, T. A. Measurement of acoustic flow resistance. **Journal of Sound and Vibration**, v. 103, n. 4, p. 567–572, 22 dez. 1985.
- ISLAM, M. R. *et al.* Stochastic continuum model for mycelium-based bio-foam. **Materials and Design**, v. 160, p. 549–556, 2018.
- ISO. International Standard 14044:2006. **Environmental management - Life cycle assesement - Requirements and guidelines, ISO 14044**, International Organization for Standardization, v. 2006, n. 7, p. 652–668, 2006.
- ISO 354. **ISO 354, Measurement of sound absorption in a reverberation room**, 2003.
- ISO 8894-2. International Standard International Standard. **61010-1 © IEC:2001**, v. 2006, p. 13, 2006.
- ISO 9053. **Acoustics-Determination of airflow resistance-Part 1: Static airflow method**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.iso.org>.
- JI, Y.; CHEN, S.; ZHU, W. The effect of pore numbers in the cell walls of soybean oil polyurethane foam on sound absorption performance. **Applied Acoustics**, v. 157, p. 107010, 2020.
- JOHNSON, D. L.; KOPLIK, J.; DASHEN, R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid saturated porous media. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 176, n. 1987, p. 379–402, 1987.
- KAIRYTĖ, A. *et al.* Cleaner production of polyurethane foam: Replacement of conventional raw materials, assessment of fire resistance and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 760–771, 2018.
- KINO, N.; UENO, T. Improvements to the Johnson-Allard model for rigid-framed fibrous materials. **Applied Acoustics**, v. 68, n. 11–12, p. 1468–1484, 2007.
- KIRBY, R. On the modification of Delany and Bazley fomulae. **Applied Acoustics**, v. 86, p. 47–49, 2014.
- KOMATSU, T. Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials. **Acoustical Science and Technology**, v. 29, n. 2, p. 121–129, 2008.
- LAURIKS, W., CASTAGNEDE, B., THOEN, J. WRIGHT, W., HUTCHINS, D., SCHINDEL, D. S. **Determination of the tortuosity of porous materials using new air-coupled ultrasonic tansducers** 11th International FASE Symposium, 1994.

LI, T. T. *et al.* Preparation and characterization of SEBS-g-MAH-filled flexible polyurethane foam composites with gradient-changing structure. **Materials and Design**, v. 183, p. 108150, 2019.

LIU, P. S.; CHEN, G. F. **Poroue Materials**. [s.l: s.n.].

LIU, Y. Inverse characterization of the frequency-dependent acoustic and elastic parameters of porous materials by surface-normal impedance method. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 140, n. 4, p. 2458–2468, out. 2016.

LIU, Z. *et al.* Acoustic properties of multilayer sound absorbers with a 3D printed micro-perforated panel. **Applied Acoustics**, v. 121, p. 25–32, 1 jun. 2017.

LOPES, F. C. R.; TANNOUN, K. Coconut fiber pyrolysis: specific heat capacity and enthalpy of reaction through thermogravimetry and differential scanning calorimetry: 504527. **Thermochimica Acta**, v. 707, 1 jan. 2022.

LU, K.; WANG, H. Estimation of Building's Life Cycle Carbon Emissions Based on Life Cycle Assessment and Building Information Modeling: A Case Study of a Hospital Building in China. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 07, n. 06, p. 147–165, 2019.

M. E. DELANY AND E. N. BAZLEY. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. **Applied Acoustics**, n. 3, 1970.

MAFRA, M. P. A.; SOEIRO, N. S.; ALVES, E. C. Determinação e Análise Comparativa dos Coeficientes de Absorção de Painéis Confeccionados a Partir da Fibra de Coco e um Painel de Uso Comercial. **XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, SP. Anais. Ilha Solteira, SP: UNESP**, 2005.

MARQUES, D. V. *et al.* Recycled polyethylene terephthalate-based boards for thermal-acoustic insulation. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p. 251–262, 2018.

MAZZON, E.; HABAS-ULLOA, A.; HABAS, J. P. Lightweight rigid foams from highly reactive epoxy resins derived from vegetable oil for automotive applications. **European Polymer Journal**, v. 68, p. 546–557, 2015.

MEDEIROS, E. P. Mamona - Óleo e coprodutos. **Embrapa**, 2022.

MEDINA, H. V DE. PRODUÇÃO E USO SUSTENTÁVEL DE MATERIAIS: GESTÃO AMBIENTAL E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA. 2006.

MEINCKEN, M. *et al.* Influence of the viscosity and the substrate on the surface hydrophobicity of polyurethane coatings. **Applied Surface Science**, v. 253, n. 2, p. 805–809, 15 nov. 2006.

MIKI, Y. Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models-. v. 1, p. 19–24, 1990.

MORSE, P. M. (PHILIP M.; INGARD, K. UNO. **Theoretical acoustics**. 1. ed. [s.l.] 21 jan 1987, 1987. v. 1

MUNJAL, M. L. **Acoustics of ducts and mufflers**. [s.l: s.n.].

NEIRA, D. **Fibras de sisal (Agave sisalana) como isolante térmico de tubulações**. Natal RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

NORMA TÉCNICA. **NORMA TÉCNICA 10/2014 - Controle de Materiais de Acabamento e Revestimento- CORPO DE BOMBEIROS MILITAR**, 2014. Disponível em: <https://www.bombeiros.go.gov.br/wp-content/uploads/2014/03/nt-10_2014-controle-de-materiais-de-acabamento-e-revestimento.pdf>. Acesso em: 22 maio. 2024

NUAWI, M. Z. *et al.* Acoustic Properties of Multi-Layer Coir Fibres Sound Absorption Panel. **Journal of Applied Sciences**, v. 8, n. 20, p. 3709–3714, 2009.

NUNES, M. U. C. **Fibra de coco na Indústria - Embrapa**.

OGUNNIYI, D. S. Castor oil: A vital industrial raw material. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 9, p. 1086–1091, jun. 2006.

OLNY, X.; PANNETON, R. Acoustical determination of the parameters governing thermal dissipation in porous media. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 123, n. 2, p. 814–824, fev. 2008.

OLNY, X.; PANNETON, R.; TRAN-VAN, J. Experimental determination of the acoustical parameters of rigid and limp materials using direct measurements and analytical solutions. **Proceedings of Forum Acusticum 2002, Sevilla, Spain**, 2002.

OPTIONS, I.; BROWN, M. T. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. **Ecological Economics**, v. 19, p. 219–235, 1996a.

OR, K. H.; PUTRA, A.; SELAMAT, M. Z. Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber. **Applied Acoustics**, v. 119, p. 9–16, 2017.

P PINTO, E. R. *et al.* **Modificação do ácido ricinolêico para obtenção de uma resina uretana** Congresso Brasileiro de Polímero. **Anais...**2009

PANNETON, R. Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 122, n. 6, p. EL217–EL222, dez. 2007.

PANNETON, R.; PILON, D.; SGARD, F. **Frame acoustical excitability: A decoupling criterion for poroelastic materials**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/257129551>>.

PAULA, C. R. P. DE. **CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLIURETANO DE ÓLEO VEGETAL COM MADEIRA DE Pinus taeda E FIBRAS DE Agave sisalana VEGETAL COM MADEIRA DE Pinus taeda E FIBRAS DE Agave sisalana.** [s.l: s.n.].

PESSOA, E.; MARTINS, M. REVISITANDO A TEORIA DO CICLO DO PRODUTO. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 11, p. 307–329, 2007.

PHANINDRA, A. *et al.* **Thermal Characterization of Sugar Cane Fiber Reinforced Composite.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.ijert.org>.

PILON, D.; PANNETON, R.; SGARD, F. Behavioral criterion quantifying the effects of circumferential air gaps on porous materials in the standing wave tube. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 116, n. 1, p. 344–356, 2004.

PORFÍRIO. Poliuretano & Tecnologia. 2023.

RAMOS, N. P. *et al.* Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1492–1500, 2016.

REN, M.; JACOBSEN, F. **A Method of Measuring the Dynamic Flow Resistance and Reactance of Porous MaterialsApplied Acoustics.** [s.l: s.n.].

REY, R. DEL *et al.* Evaluation of two alternative procedures for measuring airflow resistance of sound absorbing materials. **Archives of Acoustics**, v. 38, n. 4, p. 547–554, 2013.

REY, R. DEL *et al.* Acoustic characterization of recycled textile materials used as core elements in noise barriers. **Noise Control Engineering Journal**, v. 63, n. 5, p. 439–447, 2015.

ROBSON DE ANDRADE SANTOS. **Sisal - Embrapa.**

RODRÍGUEZ, J. C. *et al.* Estimating the airflow resistivity of porous materials in an impedance tube using an electroacoustic technique. **Applied Acoustics**, v. 201, 1 dez. 2022.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. Plantio de Cana de açúcar. **EMBRAPA**, 2022.

SADOUKI, M.; KAID, N. A.; HASINE, H. **Inverse resistivity measurement of an air-saturated porous medium via transmitted waves at Darcy's regime - Frequency approach**Proceedings of Meetings on Acoustics. **Anais...Acoustical Society of America**, 2020

SANTOS, B. M. *et al.* **Application of the hot wire method for the determination of the thermal conductivity of sugar cane fibers.** Bento Gonçalves, RS: [s.n.].

SANTOS, W. N. DOS. O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. **Cerâmica**, v. 48, n. 306, p. 86–91, 2002.

SEBAA, N. *et al.* Measuring flow resistivity of porous material via acoustic reflected waves. **Journal of Applied Physics**, v. 98, n. 8, p. 1–10, 2005.

SELAMET *et al.* Analytical approach for sound attenuation in perforated dissipative silencers with inlet/outlet extensions. **The Journal of the Acoustical Society America**, abr. 2005.

SEYBERT, A. F.; ROSS, D. F. Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique. p. 1362–1370, 1977.

SHEN, X. *et al.* Development of thin sound absorber by parameter optimization of multilayer compressed porous metal with rear cavity. **Applied Acoustics**, v. 159, 1 fev. 2020.

SILAEX. **Antichama silaex**.

SILVA, C. C. B. DA *et al.* Sound absorption coefficient assessment of sisal, coconut husk and sugar cane fibers for low frequencies based on three different methods. **Applied Acoustics**, v. 156, p. 92–100, 2019a.

SIMÕES, L. M. S. *et al.* Biomass to biofuel densification of coconut fibers: kinetic triplet and thermodynamic evaluation. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 1, p. 631–648, 1 jan. 2022.

SOENARKO, B.; SEYBERT, A. F. Visualization of Wave Propagation in Muffler. **Journal of Visualization**, v. 3, n. 3, p. 229–235, 2000.

STEINMETZ SOARES, M. **Síntese e caracterização de espumas de poliuretano para imobilização de células íntegras e aplicação na síntese de biodiesel**. São Paulo: USP, 2012.

SU, J.; ZHENG, L.; DENG, Z. Study on acoustic properties at normal incidence of three-multilayer composite made of glass wool, glue and polyurethane foam. **Applied Acoustics**, v. 156, p. 319–326, 15 dez. 2019.

SUINAGA, F. A.; COUTINHO, W. M.; SILVA, O. R. R. F. **Produção da fibra do sisal**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal/producao/pos-colheita>>. Acesso em: 23 jul. 2024.

T. IWASE; Y. IZUMI; AND R. KAWABATA. A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of a test material. **Internoise 98**, 1980.

TANG, X.; YAN, X. Multi-layer fibrous structures for noise reduction. **Journal of the Textile Institute**, v. 108, n. 12, p. 2096–2106, 2017.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais Brasileiras**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2006a.

TEJA, M. S. *et al.* **Experimental Investigation of Mechanical and Thermal properties of sisal fibre reinforced composite and effect of sic filler material** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais...** Institute of Physics Publishing, 11 out. 2016

- THOMAS, W. A.; HURST, C. J. Acoustic performance of a stretched membrane and porous blanket combination. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 59, n. 5, p. 1071–1076, 1976.
- TRELOAR, G. J. Extracting embodied energy paths from input-output tables: towards an input-output-based hybrid energy analysis method. **Economic Systems Research**, v. 9, n. 4, p. 375–391, 1997.
- TRELOAR, G. J.; LOVE, P. E. D.; HOLT, G. D. Using national input/output data for embodied energy analysis of individual residential buildings. **Construction Management and Economics**, v. 19, n. 1, p. 49–61, 2002.
- UL 94. **Standard for tests for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances**. [s.l.] Underwriters' Laboratories, 2001.
- UMNOVA, O. *et al.* Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials. **Applied Acoustics**, v. 66, n. 6, p. 607–624, 2005.
- USINA ALTO ALEGRE. **Relatório Integrado de Sustentabilidade 2017**. [s.l.: s.n.].
- VALE, M. *et al.* Replacement of petroleum-derived diols by sustainable biopolyols in one component polyurethane foams. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 1036–1043, 2019.
- VER, I.; BERANEK, L. **Noise and Vibration Control - Principles and Applications**. New Jersey: [s.n.].
- VERONESE, V. B. Relação estrutura propriedade de espumas rígidas de poliuretano à base de óleos vegetais. p. 121, 2009.
- VISCUSI, G. *et al.* Natural fiber reinforced inorganic foam composites from short hemp bast fibers obtained by mechanical decortation of unretted stems from the wastes of hemp cultivations. **Materials Today: Proceedings**, n. xxxx, p. 1–4, 2020.
- VORONINA, N. An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity. **Applied Acoustics**, v. 51, n. 2, p. 181–198, 1997.
- VORONINA, N. An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity. v. 58, p. 295–304, 1999.
- WANG, Y. *et al.* Sound absorption of a new bionic multi-layer absorber. **Composite Structures**, v. 108, n. 1, p. 400–408, 2014.
- WU, G. Q. *et al.* Calculation of resonant sound absorption parameters for performance evaluation of metal rubber material. **Science in China, Series E: Technological Sciences**, v. 52, n. 12, p. 3587–3591, dez. 2009.

WU, N. *et al.* Synthesis of reactive phenylphosphoryl glycol ether oligomer and improved flame retardancy and mechanical property of modified rigid polyurethane foams. **Materials and Design**, v. 181, p. 107929, 2019.

ZHANG, Z. M.; GU, X. T. **The theoretical and application study on a double layer microperforated sound absorption structure** *Journal of Sound and Vibration*. [s.l: s.n.].

ZHOU, X. *et al.* Dispersion and reinforcing effect of carrot nanofibers on biopolyurethane foams. **Materials and Design**, v. 110, p. 526–531, 2016.

WEB-PESQUISA

EBRACON, pesquisado em < <https://abrecon.org.br/ha-males-que-vem-para-o-bem/>> por Levi Torres, postado 30 de maio de 2018, em Notícia

IBGE, pesquisado 31/07/2023 em < [Produção de Cana-de-açúcar no Brasil | IBGE](#) cana-de-açúcar > por PAN, postado em 2021

Conab, pesquisado 31/07/2023 em < [Conab - Produção de cana-de-açúcar deve crescer 4,4% na safra 2023/24, estimada em 637,1 milhões de toneladas](#) cana-de-açúcar > por Gerencia de empresa, 26 de Abril de 2023

FAPESP, Pesquisado 31/07/2023 em < [Propriedades do bagaço da cana-de-açúcar : Revista Pesquisa Fapesp](#) cana-de-açúcar > por Fapesp

Raízen, pesquisado 31/07/2023 em < [Produção de açúcar: conheça suas etapas e como funciona na Raízen \(raizen.com.br\)](#) cana-de-açúcar > por Raízen

Embrapa, pesquisado 31/07/2023 em < [Plantio - Portal Embrapa](#) cana-de-açúcar > por Embrapa

Embrapa, pesquisado 31/07/2023 em < [Estatística da produção - Portal Embrapa](#) coco > por Embrapa

Embrapa, pesquisado 03/08/2023 < [Fibra de coco na Indústria - Portal Embrapa](#) coco > por Embrapa

Embrapa, pesquisado 03/08/2023 < [Coco - Portal Embrapa](#) > por Embrapa

Revista Campo e negócio, pesquisado 03/08/2023 < [Coco: Produção no Brasil | Revista Campo & Negócios \(revistacampoenegocios.com.br\)](#) coco> por Campo e negócios

Embrapa, pesquisado 03/08/2023 < [Produção de Coco-da-baía no Brasil | IBGE](#) coco> por Embrapa

Embrapa, pesquisado 03/08/2023 < [Sisal - Portal Embrapa](#) sisal> por Embrapa

Oliveira, P. LeiamaisBa. pesquisado 04/08/2023 < [Mais de 500 mil pessoas dependem do sisal na Bahia \(leiamaisba.com.br\)](#) sisal> por LeiamaisBa

IBGE, pesquisado 04/08/2023 < [IBGE | Cidades@ | Bahia | Itaguaçu da Bahia | Pesquisa | Produção Agrícola - Lavoura Permanente | Abacate](#) sisal> por IBGE

IBGE, pesquisado 04/08/2023 < [IBGE | Cidades@ | Brasil | Pesquisa | Produção Agrícola - Lavoura Permanente | Abacate](#) sisal> por IBGE

PGMEC, pesquisado 13/09/2024 em < [VI RelaçOES constitutivas \(ufpr.br\)](#)>Por Dr. Almeida, 2012.

CONAB, pesquisado 18/08/2023 <[Conab - Produção nacional de grãos é estimada em 312,2 milhões de toneladas na safra 2022/23](#) milho> por CONAB

IBGE, pesquisado 18/08/2023 < [Levantamento Sistemático da Produção Agrícola | IBGE](#) milho> por IBGE

EMBRAPA, pesquisado 18/08/2023 < [Artesanato com palha de milho.indd \(embrapa.br\)](#) milho> por Embrapa

Conab, pesquisado 21/08/2023 <[Conab - BAHIA – Safra estadual de grãos estimada em 12 milhões de toneladas](#) mamona> por Conab

AUDIUM, pesquisado 23/05/2024 <[A importância dos materiais acústicos anti chamusca \(audium.com.br\)](#)> por AUDIUM

ONU, pesquisado 22/07/2024 <[Como as construções sustentáveis contribuem para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU? \(gbcbrasil.org.br\)](#)> por ONU, Publicado 15/10/2020.

Curso online UOV, pesquisando em 23/07/2024 <[Colheita de coco deve ser feita de acordo com o destino dado ao fruto - Cursos Online UOV com Certificado - Educação a Distância](#)> por UOV, Publicado 2019

COTESI, pesquisado em 24/07/2024 <[A Fibra de Sisal :: COTESI - Sisal do Brasil](#)> por COTESI

Feira de produtos UFRGS, pesquisado em 24/07/2024 < [A Feira- produtos \(ufrgs.br\)](#)> por Alimentus – UFRGS

ABREPUR, pesquisado em 15/04/2020 <Reciclagem do poliuretano é viável, ABREPUR. Available: <http://abripur.org/473-2/>.> por Candido, Publicado 2016

ULBRA, pesquisado em 15/04/2020 < Utilização de rejeito de Poliuretano na produção de concreto leve, ULBRA. <http://www.periodicos.ulbra.br/index.php/ic/article/view/3387>> por Pinto, A. G.; Collato, D, Publicado 2017

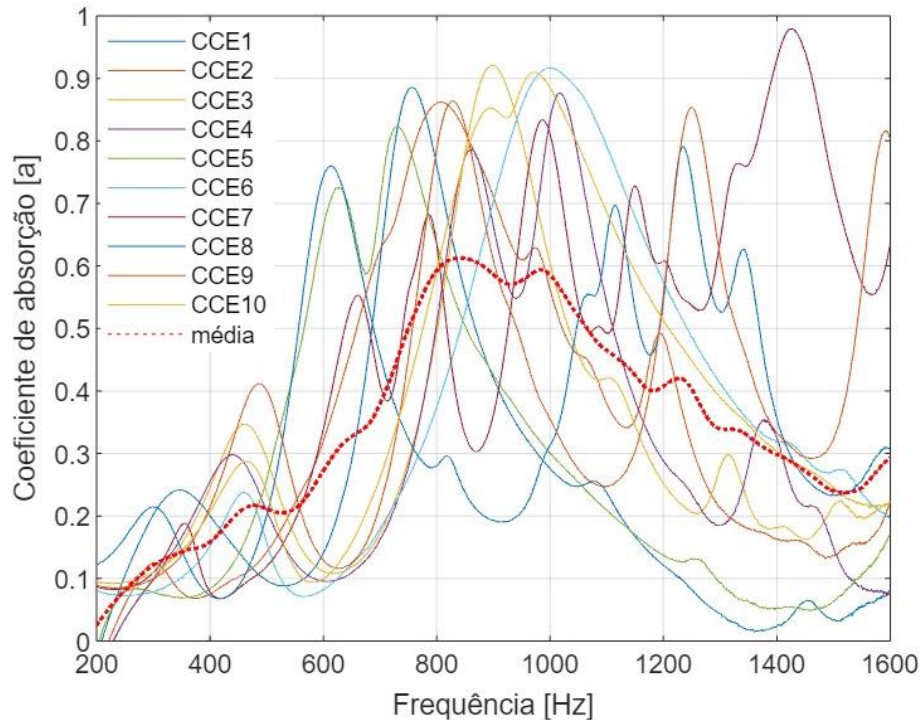
Reciclagem, pesquisado em 26/09/2024 <[Estações do Ano \(fiocruz.br\)](#)> por Nunes, C.; Silva, I.

Sanepar, pesquisado em 28/01/2025 <<https://site.sanepar.com.br/informacoes/economia>> por dicas de economia, SANEPAR

APÊNDICE A

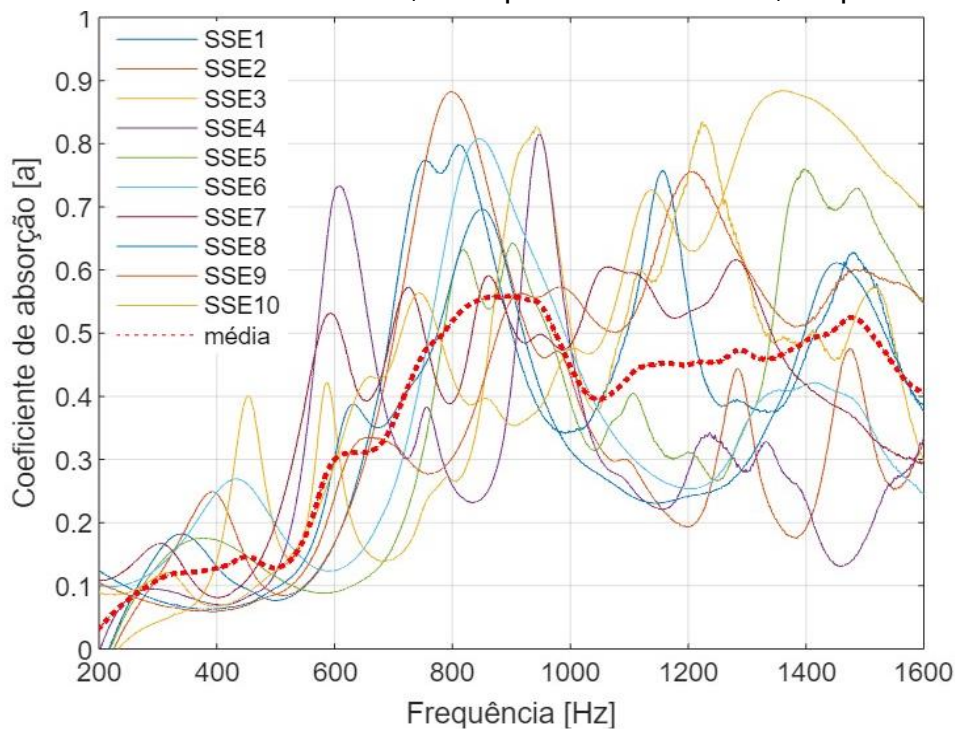
Medição de todas as amostras com as suas respectivas médias.

Gráfico 35: Amostras de PU/fibra de coco, linha pontilhada a média, freq. de 200-1600 Hz



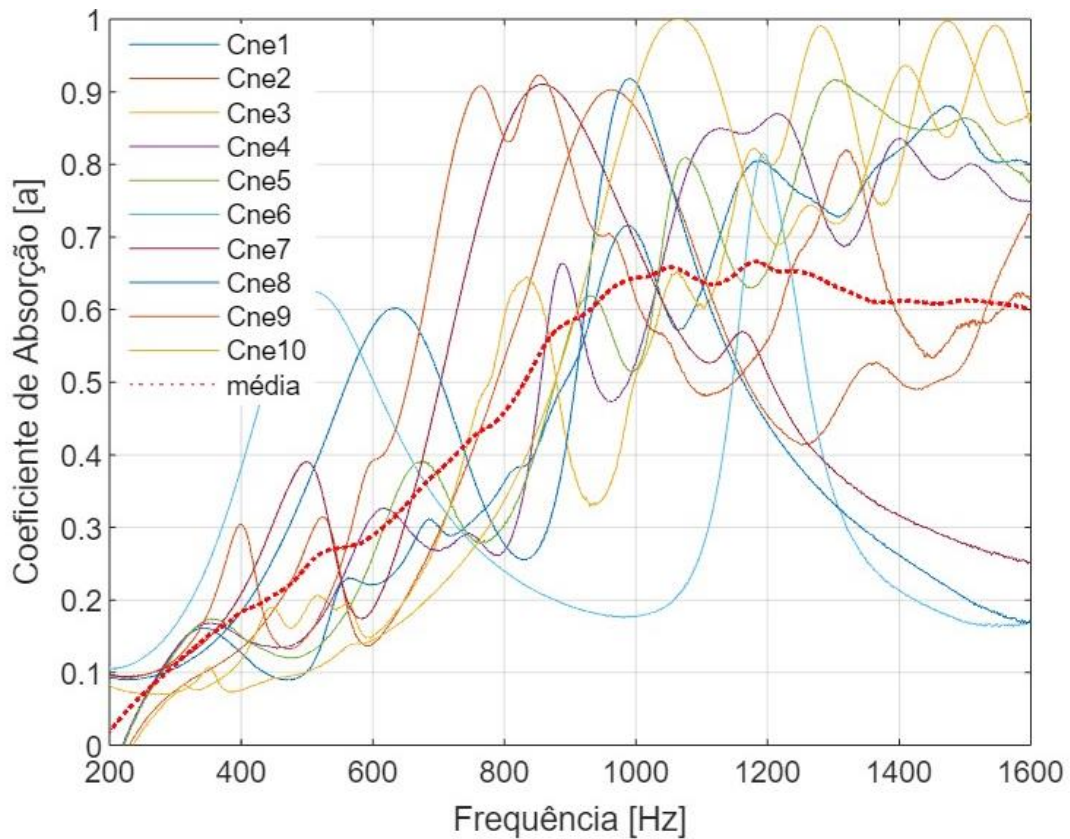
Fonte: A autora, 2024.

Gráfico 36: Amostras de PU/fibra de sisal, linha pontilhada a média, freq. de 200-1600 Hz



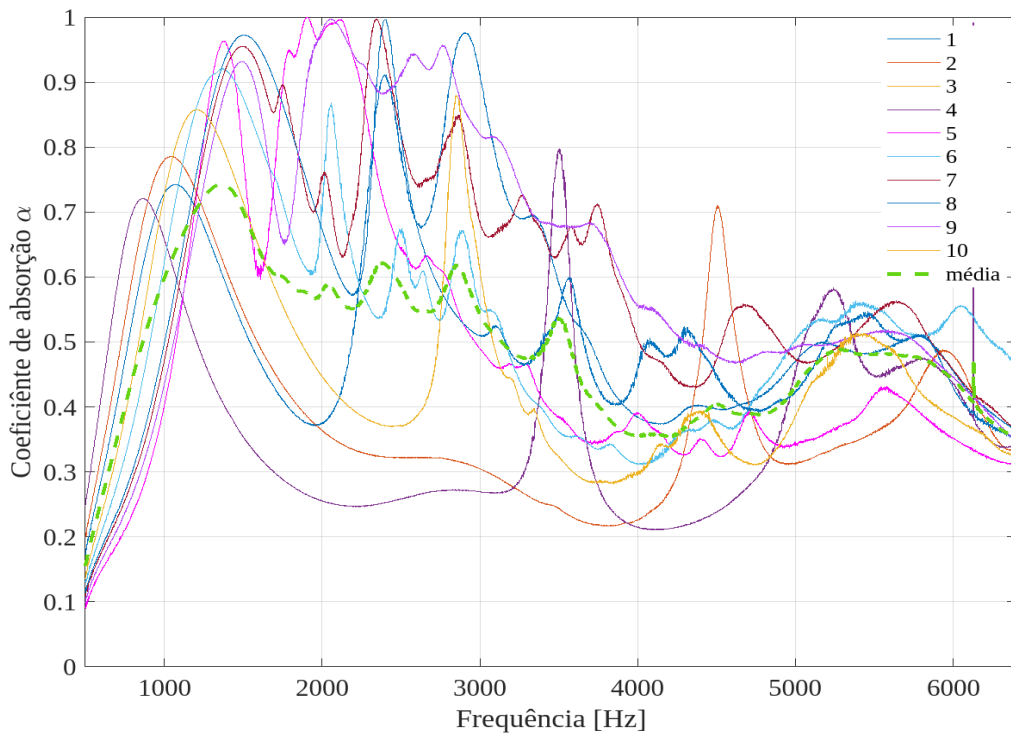
Fonte: A autora, 2024.

Gráfico 37: Amostras de PU/fibra de cana-de-açúcar, linha pontilhada a média, freq. de 200-1600 Hz

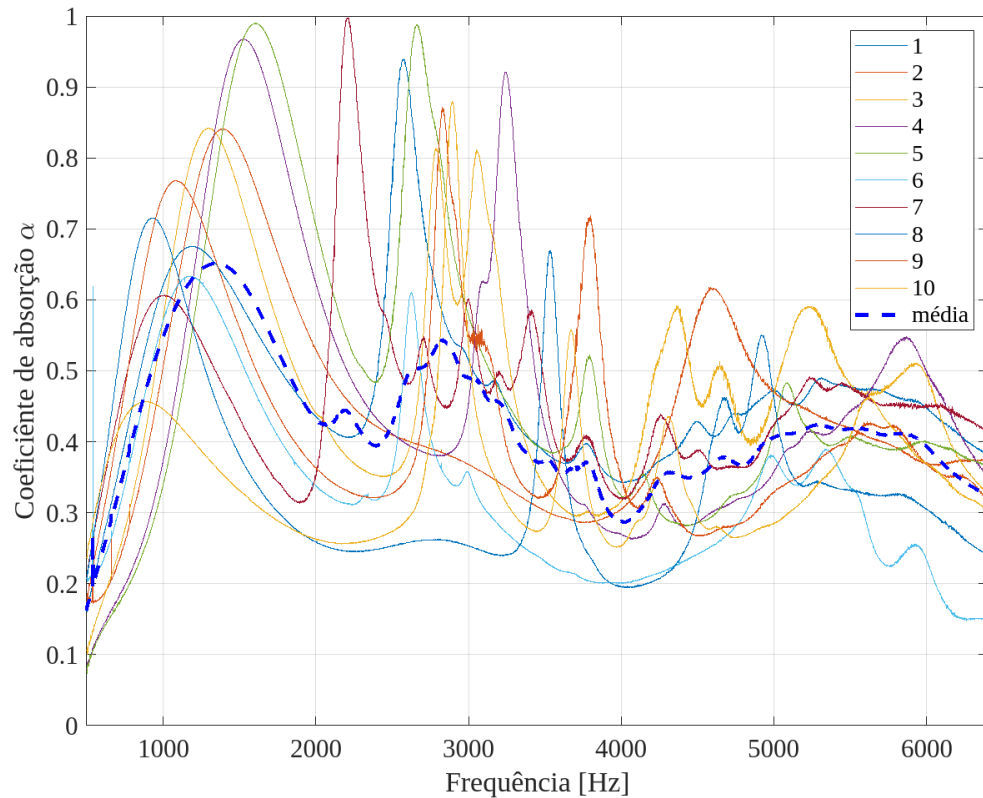


Fonte: A autora, 2024.

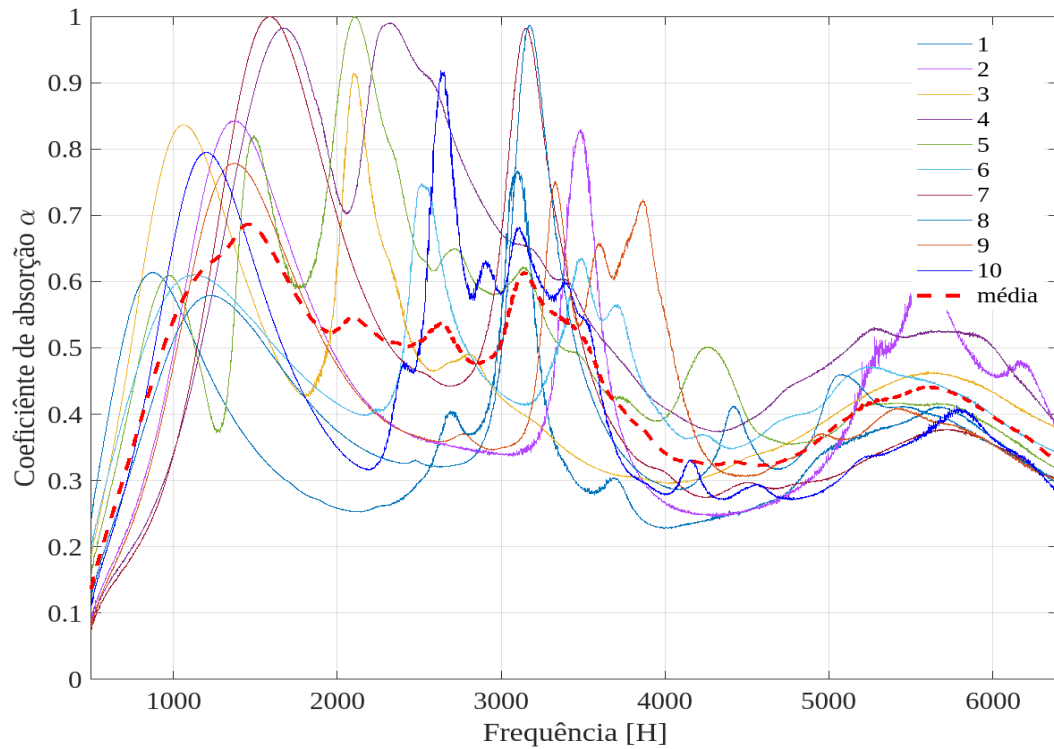
Gráfico 38: Amostras de PU/ fibra de cana-de-açúcar, linha pontilhada a média, freq. de 200-6000 Hz



Fonte: A autora, 2024.

Gráfico 39: Amostras de PU/ fibra de coco, linha pontilhada a média, freq. de 400-6000 Hz

Fonte: A autora, 2024.

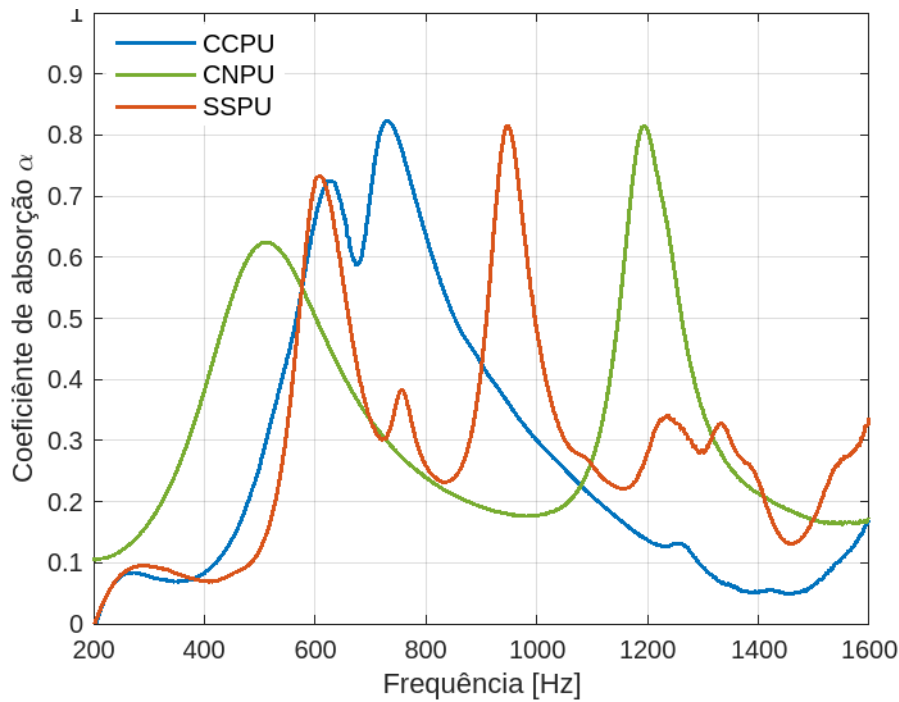
Gráfico 40: Amostras de PU/ fibra de sisal, linha pontilhada a média, freq. de 400-6000 Hz

Fonte: A autora, 2024.

APÊNDICE B

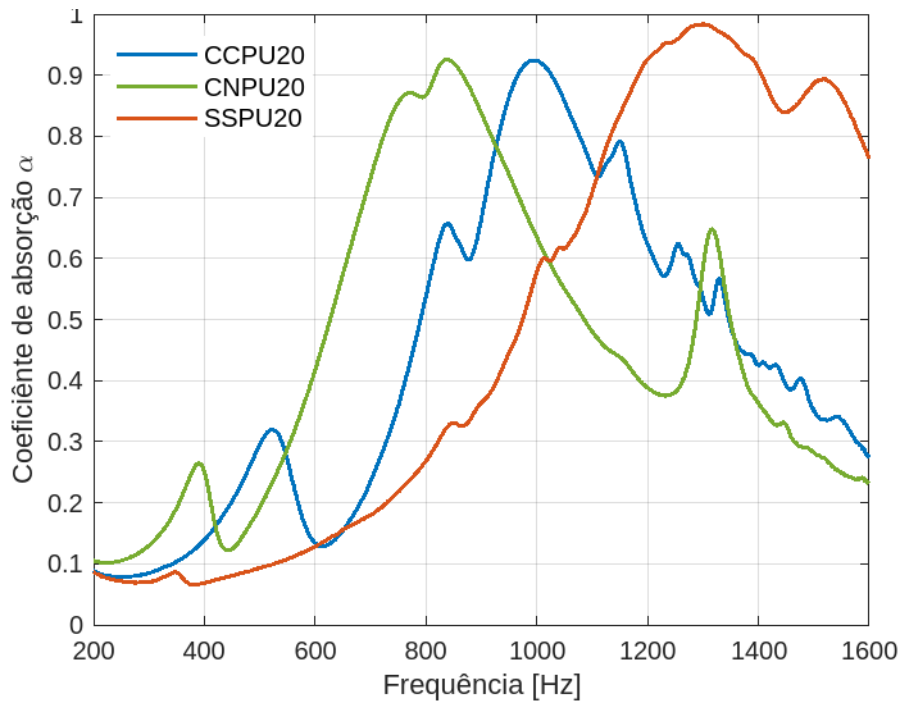
Medição das amostras sem alfinetes e com 20,40,60 e 98 alfinetes.

Gráfico 41: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar sem alfinetes

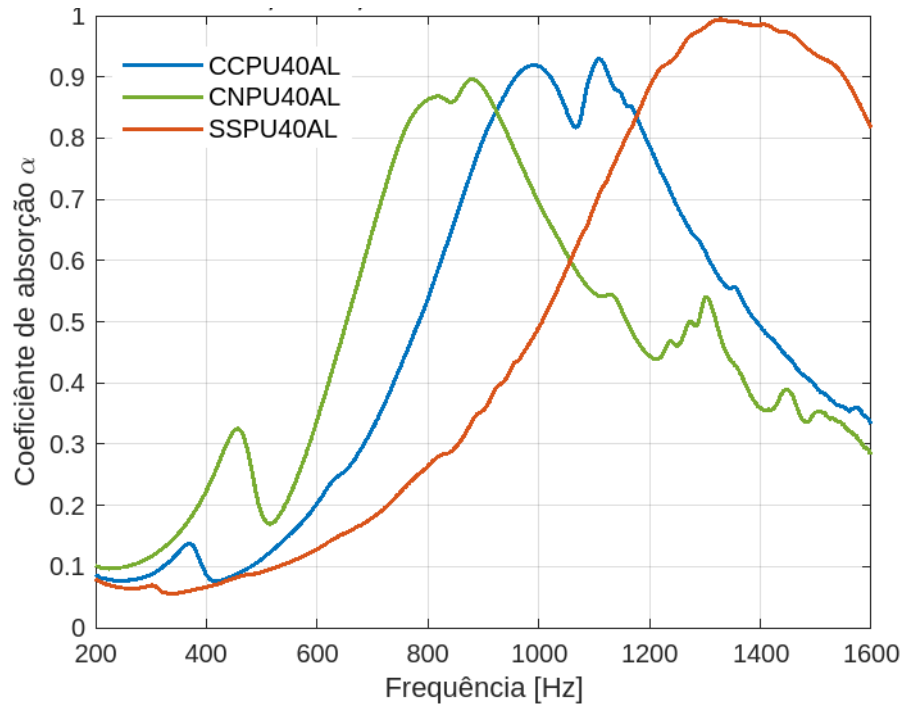


Fonte: A autora, 2024.

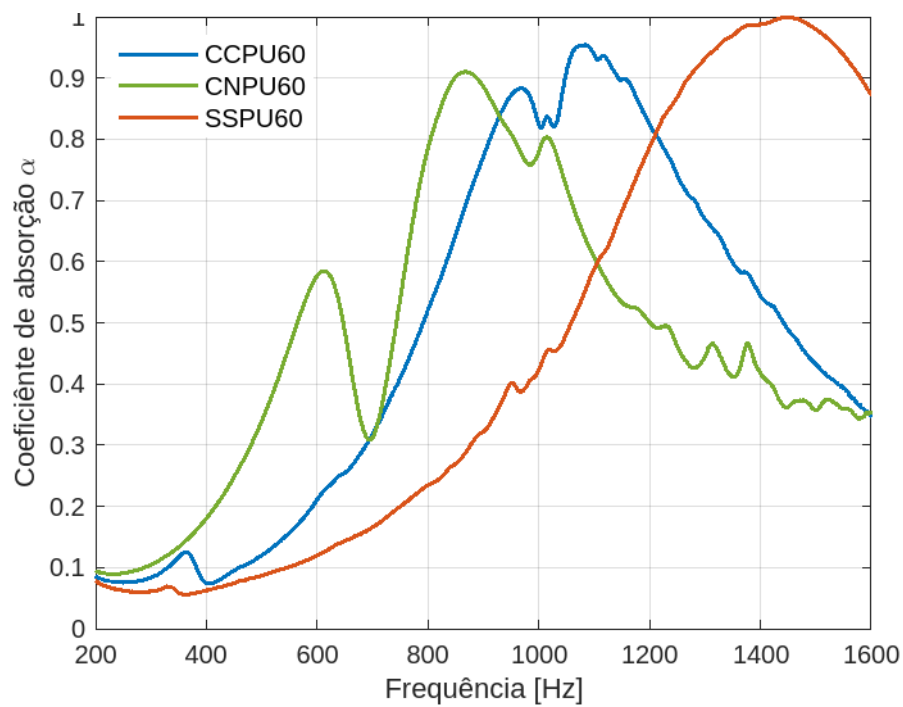
Gráfico 42: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar com 20 alfinetes



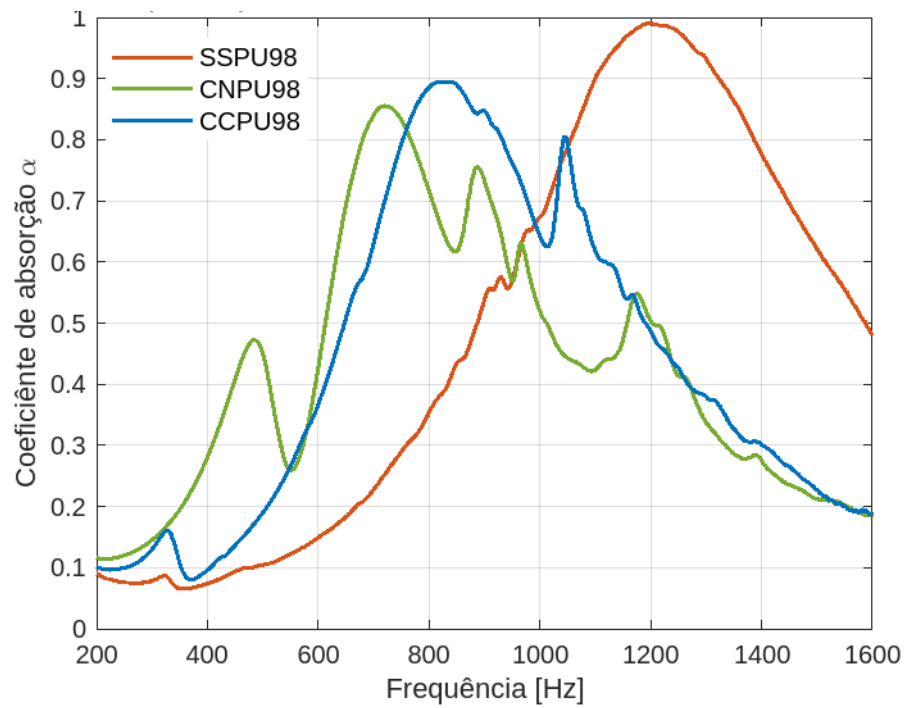
Fonte: A autora, 2024.

Gráfico 43: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar com 40 alfinetes

Fonte: A autora, 2024.

Gráfico 44: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar com 60 alfinetes

Fonte: A autora, 2024.

Gráfico 45: Amostras de PU/ fibra de coco, sisal e cana-de-açúcar com 98 alfinetes

Fonte: A autora, 2024.