



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Marcelo Euclides de Souza

O AGLOMERADO DO COLMO DO BAGAÇO DA
CANA-DE-AÇÚCAR
COMO ELEMENTO DE ABSORÇÃO SONORA
PARA CONDICIONAMENTO ACÚSTICO

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma
Construção Sustentável orientada pelo Professor Doutor Paulo Jorge
Rodrigues Amado Mendes e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão
Godinho e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Março de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Marcelo Euclides de Souza

O AGLOMERADO DO COLMO DO BAGAÇO DA CANA-DE- AÇÚCAR COMO ELEMENTO DE ABSORÇÃO SONORA PARA CONDICIONAMENTO ACÚSTICO

SUGAR CANE'S CULM BAGASSE AS SOUND ABSORPTION ELEMENT FOR ACOUSTIC
CONDITIONING

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável
orientada pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Março de 2022



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Retomar os estudos após anos afastado da vida acadêmica não é tarefa fácil, principalmente quando temos de conciliar com a rotina profissional o desafio se torna ainda maior. Com isso, sem a ajuda da família, amigos, professores e colegas, seria uma tarefa quase impossível.

Portanto, quero aqui converter os meus sentimentos de gratidão em palavras para poder agradecer em especial a minha esposa Jaqueline e ao meu filho Nicolas que tanto me apoiaram e contribuíram de forma incondicional em todos os momentos, estendo também meus agradecimentos:

- Aos Professores e orientadores Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes e Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho, pela ajuda prestada e todo conhecimento transmitido;
- Ao Professor Doutor Paulo Henrique Mareze, pela ajuda prestada na realização de parte dos ensaios, além do contributo intelectual para que esta pesquisa se tornasse possível;
- Ao MSc Fernando Diaz (Brüel & Kjør), pela ajuda prestada na realização de parte dos ensaios, e todo o suporte com dicas e sugestões para que esta pesquisa se tornasse possível;
- Ao Denison Francisco de Oliveira (Brüel & Kjør), por ter aberto as portas da B&K para realização dos ensaios e suporte;
- A Marina Campos Oliveira Silva, minha amiga e colega de trabalho, pela imensa ajuda e prontidão;
- Ao Henrique Severiano, amigo e colega de trabalho, pela realização das imagens em laboratório;
- Ao Renê Andrade, pela ajuda prestada;
- Ao Rodrigo Alflen (Bovenau), pela ajuda prestada;
- A todos os autores das referências bibliográficas, que tanto contribuíram para este trabalho.

RESUMO

Quando falamos em desenvolvimento sustentável, sabemos que temos um longo caminho a percorrer, principalmente para os países menos desenvolvidos. O reaproveitamento sustentável de subprodutos de algumas indústrias pode fazer uma grande diferença, não apenas para o meio ambiente, mas também para o desenvolvimento socioeconômico. Demonstrando a importância e preocupação em torno deste assunto, nas últimas três décadas, vêm sendo promovidos importantes eventos voltados para este tema, como a conferência Rio-92, que teve como principal resultado a Agenda 21, o Pacto Global e, mais recentemente, o Acordo de Paris 2015. Trata-se de uma preocupação mundial sobre o futuro e a qualidade de vida de todos. Diante de tamanho desafio e buscando cooperar com a destinação de um resíduo proveniente da indústria sucroalcooleira e outras que fazem o uso da mesma matéria-prima, esse trabalho objetiva estudar a viabilidade técnica do uso do aglomerado do colmo do bagaço da cana-de-açúcar como produto a ser utilizado na fabricação de painéis e placas para tratamento acústico de espaços. Segundo Rodrigues e Ross (2020), o colmo é a parte principal da cana-de-açúcar, pois é dele que se extrai o caldo, de onde se inicia a produção do açúcar e do álcool. O bagaço da cana-de-açúcar tem sido explorado na co-geração de energia elétrica, na fabricação de ração animal, fertilizante para lavoura e até na construção civil, com a adição das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em concretos e argamassa. Por se tratar de um resíduo tão abundante, certamente há espaço para ser explorado na área de materiais para tratamento/ condicionamento acústico. A pesquisa prevê a manipulação do material para composição das amostras, aplicação de aditivos que se fizerem necessários para obtenção de um produto aderente ao mercado, medição do índice de absorção sonora utilizando tubo de impedância conforme a norma ISO 10534-2 e avaliação final sobre a viabilidade técnica de utilização de tal material em produtos de condicionamento acústico.

Palavras-chave: Bagaço da cana-de-açúcar, Colmo da cana-de-açúcar, Absorção sonora, Tratamento/ condicionamento acústico, Desenvolvimento sustentável, Materiais sustentáveis, Fibras naturais.

ABSTRACT

When we talk about sustainable development, we know that we have a long way to go, especially for underdeveloped countries. The sustainable reuse of by-products from some industries can make a big difference, not only for the environment, but also for socioeconomic development. Demonstrating the importance and concern around this subject, in the last three decades, important events focused on this theme have been promoted, such as the Rio-92 conference, whose main result was Agenda 21, the Global Compact and, more recently, the Paris 2015 the climate change conference. It is a worldwide concern about the future and quality of life for all. Faced with such a challenge and seeking to cooperate with the destination of a residue from the sugar and alcohol industry and others that use the same raw material, this work aims to study the technical feasibility of using the sugar cane's culm bagasse as a product to be used in the manufacture of panels for the acoustic treatment of spaces. According to Rodrigues and Ross (2020), the culm is the main part of sugar cane, since it is where do you get the juice from and where the production of sugar and alcohol begins. Sugar cane's bagasse has been exploited in the co-generation of electricity, in the manufacture of animal feed, fertilizer for crops and even in civil construction, with the addition of sugar cane bagasse ashes in concrete and grout. Because it is such an abundant residue, there is opportunity to be explored in the area of materials for acoustic treatment/conditioning. The research foresees the manipulation of the material for the composition of the samples, application of additives that are necessary to obtain a product that adheres to the market, measurement of the sound absorption coefficient using an impedance tube according to the ISO 10534-2 standard and evaluation of the technical feasibility of using such material in acoustic conditioning products.

Keywords: Sugar cane's bagasse, Sugar cane's culm, Sound absorption, Acoustic treatment/conditioning, Sustainable development, Sustainable materials, Natural fibers.

INDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento Geral	1
1.2	Objetivos do Trabalho	3
1.3	Estrutura do Trabalho	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	Definição de Som e Ruído	4
2.2	Geração e Propagação do Som	4
2.3	Frequência (<i>f</i>) do Som.....	6
2.4	Impedância Acústica Específica	6
2.5	Absorção Sonora.....	6
2.6	Materiais Absorventes	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	Materiais de Traços Porosos ou Fibrosos	14
3.1.1	Materiais Porosos	14
3.1.2	Materiais Fibrosos	15
3.2	Fibras Naturais	16
3.2.1	Fibra da Cana-de-açúcar.....	17
3.2.2	Fibra da Casca de Coco	18
4	METODOLOGIA	20
4.1	Materiais	20
4.1.1	Matéria-Prima.....	20
4.1.2	Aditivos e Adesivo	21
4.1.3	Equipamentos e Dispositivos	21
4.2	Análise de Microscópica Eletrônica de Varredura (MEV) da Fibra do Colmo do Bagaço da Cana-de-açúcar.....	22
4.3	Processo de Preparação das Amostras do Aglomerado do Colmo do Bagaço da Cana-de-Açúcar	24
4.3.1	Secagem Inicial do Bagaço.....	27
4.3.2	Separação, Trituração e Peneiramento	28

4.3.3	Lavagem e Secagem	30
4.3.4	Pesagem do Material para cada Amostra	31
4.3.5	Aplicação de Preservante contra Fungos e Insetos.....	32
4.3.6	Aplicação de Cola Adesiva.....	33
4.3.7	Deposição do Material no Molde para Conformação e Prensagem Controlada.	34
4.3.8	Secagem e Aplicação de Retardante de Chamas	36
4.3.9	Aferição Final de Dimensional e Peso e Identificação das Amostras	37
4.4	Instrumentação e Norma ISO 10534-2	39
4.5	Procedimentos de Medição do Coeficiente de Absorção Sonora	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1	Detalhamento dos Resultados do Coeficiente de Absorção Sonora	51
5.1.1	Tubo de Impedância com diâmetro de 97 mm. Amostras 01 e 02.	51
5.1.2	Tubo de Impedância com diâmetro de 97 mm. Amostras 04 e 05.	52
5.1.3	Tubo de Impedância com diâmetro de 97 mm e 100 mm. Amostras 11 e 15, respectivamente.	54
5.1.4	Tubo de Impedância com diâmetro de 100 mm. Amostra 13.	55
5.1.5	Tubo de Impedância com diâmetro de 27,7 mm. Amostras 06 e 07.	56
5.1.6	Tubo de Impedância com diâmetro de 27,7 mm. Amostras 08 e 09.	57
5.1.7	Tubo de Impedância com diâmetro de 29 mm. Amostras 19 e 21.	58
5.1.8	Coeficientes de Absorção x Variabilidades Físicas das Amostras	60
5.1.9	Análise do Coeficiente de Absorção da Fibra do Colmo da Cana-de-Açúcar em relação a outros Produtos	61
5.2	Resultados do Ensaio de Resistividade ao Fluxo de Ar.....	62
5.3	Reação ao Fogo.....	64
6	CONCLUSÕES.....	67
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Imagem ilustrativa da colheita manual da cana-de-açúcar	1
Figura 2.1 – Evolução da pressão sonora total PT em função do tempo em um ponto qualquer do espaço (adaptado de Isbert, 1998)	5
Figura 2.2 – Exemplos de oscilações nas frequências 1Hz e 10Hz (adaptado de Isbert, 1998).	6
Figura 2.3 - Balanço energético do som que incide sobre uma superfície (Bistafa, 2018)	7
Figura 2.4 – Variação típica do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes porosos/ fibrosos sobre superfície sólida. (Bistafa, 2018).....	12
Figura 2.5 – Fatores que influenciam a absorção sonora de materiais porosos/ fibrosos. (Bistafa, 2018)	12
Figura 3.1 – Tipos de materiais porosos e sua estrutura (Cao et al, 2018).....	15
Figura 3.2 - Figura adaptada da constituição da cana-de-açúcar, destacando o colmo (Oliveira, 2013).....	17
Figura 3.3 - Gráfico representando a absorção sonora da fibra da casca de coco (Albuquerque et al, 2012/2013).....	19
Figura 3.4 - Gráfico representando a absorção sonora da fibra da casca de coco adaptado de *(Coco Verde@) e *(Carvalho, 2019)	19
Figura 4.1 - Bagaço da cana-de-açúcar após a moagem para extração do caldo (Autor)	20
Figura 4.2 - Amostra do bagaço da cana de açúcar enviado ao laboratório (Autor).....	23
Figura 4.3 - Extrato da amostra analisada (Autor)	23
Figura 4.4 - Bagaço da cana-de-açúcar, MEV, 33x (Autor).....	24
Figura 4.5 - Bagaço da cana-de-açúcar, MEV, 100x (Autor).....	24
Figura 4.6 – Molde para conformação de amostras de 100 mm de diâmetro (Autor).....	25
Figura 4.7 – Molde para conformação de amostras de 96 mm de diâmetro (Autor).....	25
Figura 4.8 – Molde para conformação de amostras de 27 mm de diâmetro (Autor).....	26
Figura 4.9 – Etapas de preparação das amostras do aglomerado do colmo do bagaço da cana-de-açúcar (Autor).....	27
Figura 4.10 - Bagaço da cana-de-açúcar em fase de secagem ao ar livre (Autor)	28
Figura 4.11 – Colmo do bagaço da cana-de-açúcar separado (Autor)	28
Figura 4.12 – Colmo do bagaço da cana-de-açúcar triturado (Autor).....	29
Figura 4.13 – Colmo do bagaço da cana-de-açúcar peneirado em dispositivo com malha de 35 mm (Autor).....	30

Figura 4.14 – Colmo do bagaço da cana-de-açúcar em seu processo de secagem pós lavagem (Autor)	31
Figura 4.15 – Protótipo base para confecção das amostras (Autor)	32
Figura 4.16 - Projeto 2D da prensa hidráulica com vista em corte frontal (Autor).....	35
Figura 4.17 – Prensagem de amostra de 100 mm (Autor).....	35
Figura 4.18 – Prensagem de amostra de 29 mm (Autor).....	36
Figura 4.19 – Perda de material das amostras (Autor)	37
Figura 4.20 - Geometria do tubo de impedância (adaptado de Brüel & Kjær@).....	39
Figura 4.21 - Tubo de impedância de 100 mm modelo 4206 da marca Brüel & Kjær (Brüel & Kjær@).....	41
Figura 4.22 - Tubo de impedância de 29 mm modelo 4206 da marca Brüel & Kjær (Brüel & Kjær@).....	41
Figura 4.23 – Kit do tubo de impedância de 97 mm do laboratório de acústica da UFSM (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM).....	42
Figura 4.24 - Tubo de impedância de 27,7 mm do laboratório de acústica da UFSM (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM).....	43
Figura 4.25 – Kit do tubo de impedância de 27,7 mm do laboratório de acústica da UFSM (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM)	43
Figura 4.26 - Amostra 19 lixada (MSc Fernando Diaz)	44
Figura 4.27 - Amostra 18 com fundo lixado e plástico filme envolvendo-a (MSc Fernando Diaz)	45
Figura 4.28 - Amostra 18 com fundo lixado e massa de modelar (MSc Fernando Diaz)	45
Figura 4.29 - Amostra 18 com fundo lixado, massa de modelar e gel de ultrassom (MSc Fernando Diaz)	46
Figura 4.30 – Coeficiente de absorção sonora, em escala linear de frequência, da Amostra 18.....	46
Figura 4.31 – Amostra 5 com lateral envolvida por fita (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM).....	47
Figura 4.32 – Amostra 5 com lateral envolvida por elástico (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM).....	47
Figura 4.33 – Amostra 2 com lateral envolvida por EVA (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM).....	48
Figura 4.34 – Amostra 2 com lateral envolvida por EVA posicionada no tubo de impedância (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM)	48
Figura 5.1 – Coeficiente de absorção sonora das Amostras 01 e 02	52

Figura 5.2 – Coeficiente de absorção sonora da Amostra 04	53
Figura 5.3 – Coeficiente de absorção sonora da Amostra 05	54
Figura 5.4 – Coeficiente de absorção sonora das Amostras 11 e 15	55
Figura 5.5 – Coeficiente de absorção sonora da Amostra 13	56
Figura 5.6 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, das Amostras 06 e 07.....	57
Figura 5.7 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, das Amostras 08 e 09.....	58
Figura 5.8 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, da Amostra 19.....	59
Figura 5.9 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, da Amostra 21.....	59
Figura 5.10 - Correlação entre os resultados de absorção sonora em função das variabilidades físicas das amostras de maior diâmetro	60
Figura 5.11 - Correlação entre os resultados de absorção sonora em função das variabilidades físicas das amostras de menor diâmetro.	61
Figura 5.12 – Resultados do ensaio de resistividade ao fluxo de ar	63
Figura 5.13 – Amostra com adição de solução retardante a chamas submetida ao fogo (Autor).. ..	65
Figura 5.14 – Resultado final após submissão da amostra com adição de solução retardante a chamas ao fogo (Autor).....	65
Figura 5.15 –Amostra sem adição de solução retardante a chamas submetida ao fogo (Autor).....	66

INDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficientes de absorção sonora de materiais e de revestimentos de superfícies (Bistafa, 2018)	8
Tabela 2.2 - Coeficientes de absorção sonora de materiais porosos/ fibrosos (Bistafa, 2018) ..	9
Tabela 2.3 – Coeficientes de absorção sonora de fibras brutas (Carvalho, 2019).....	10
Tabela 4.1 - Peso esperado do colmo do bagaço aplicado em cada amostra	31
Tabela 4.2 – Volume, em ml, de preservante aplicado em cada amostra, considerando seu diâmetro e espessura.	32
Tabela 4.3 – Volume, em ml, da mistura de cola e água aplicada em cada amostra considerando seu diâmetro e espessura	34
Tabela 4.4 - Proporção de aplicação do aditivo retardante de chamas, em cada amostra, considerando seu diâmetro e espessura.	37
Tabela 4.5 - Identificação das amostras com informações detalhadas	38
Tabela 5.1 – Amostras ensaiadas e o seu coeficiente de absorção.	50
Tabela 5.2 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, de diferentes materiais *(Coco Verde@), *(Carvalho, 2019), *(Rock Fibras@)	61
Tabela 5.3 – Tabela adaptada de resistividade ao fluxo de ar de alguns materiais (Mareze, 2013).....	64

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o enquadramento geral do tema e os objetivos pretendidos no desenvolvimento desta dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável.

1.1 Enquadramento Geral

A busca por materiais sustentáveis tem sido cada vez maior e o reaproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar, um subproduto da indústria sucroalcooleira e outras que fazem uso da mesma matéria-prima, pode fazer uma grande diferença não apenas para o desenvolvimento sustentável, mas também para a sustentabilidade socioeconômica de um país como o Brasil.

Segundo os autores Battistelle et al (2008), a cana-de-açúcar é tida como a cultura agrícola mais importante da história da humanidade, pois provocou alterações nos planos econômicos, ecológicos e comerciais. A cana foi introduzida no Brasil em 1502, plantada inicialmente na região litorânea, e, em 1550, já havia numerosos engenhos produzindo açúcar de qualidade equivalente ao da Índia. A Figura 1.1 ilustra o processo de colheita da cana-de-açúcar que, na época em questão, era realizado de forma manual e ainda é dessa forma para indústrias de pequeno porte ou para uso familiar.



Figura 1.1 - Imagem ilustrativa da colheita manual da cana-de-açúcar

Rodrigues e Ross (2020) explicam que, no Brasil, o percurso da cana-de-açúcar se iniciou com a agromanufatura açucareira, cujo objetivo principal era a produção de açúcar, inicialmente produzido em engenhos movidos a força animal ou hidráulica. Com a ampliação dos canaviais e aprimoramento das técnicas de produção, os engenhos deram lugar às indústrias açucareiras. Por volta de 1930, a agroindústria brasileira se encontrava em situação bastante frágil, com uma superprodução de açúcar e não conseguindo comercializá-lo nem para o exterior e nem para o mercado interno. Então são adotadas medidas para limitar a produção de açúcar e acelerar a industrialização do álcool, sendo assim considerado o início da indústria sucroalcooleira.

Conforme é exposto por Rodrigues e Ross (2020), ao longo dos anos a indústria sucroalcooleira passou por vários momentos de instabilidade, além de crises econômicas mundiais, resultando na desregulamentação do setor canavieiro e na redução da rentabilidade de açúcar e de álcool. Dessa forma ocorre o surgimento de novos produtos derivados da cana-de-açúcar, que poderiam ter alto valor agregado. Concomitantemente, as usinas maiores passaram a vislumbrar outras possibilidades, como o uso do bagaço da cana na produção de energia térmica e elétrica e, com isso, o setor até então conhecido como sucroalcooleiro passou a ser denominado de sucroenergético.

Atualmente, o Brasil é considerado o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia e pela China. O IBGE@ reporta que, em 2020, a produção da cana-de-açúcar no Brasil foi de 677,9 milhões de toneladas, o que geraria em torno de 190 milhões de toneladas de bagaço, considerando que o bagaço representa de 25% a 30% do peso da cana moída. Em larga escala, 1 tonelada de cana processada gera em torno de 250 a 280 kg de bagaço, segundo Rodrigues e Ross (2020). Trata-se de um grande volume de resíduo a ser corretamente destinado.

Diante de números tão expressivos em relação a esse material e do apelo pela busca de soluções sustentáveis, surgiu a motivação para desenvolvimento dessa pesquisa.

No contexto científico, essa pesquisa objetiva obter o coeficiente de absorção sonora (α) do aglomerado do colmo da cana-de-açúcar, utilizando tubo de impedância com base na norma ISO 10534-2, assim como efetuar a análise da viabilidade técnica do mesmo em ser utilizado na fabricação de painéis acústicos em comparação com painéis para tratamento acústico já existentes no mercado.

1.2 Objetivos do Trabalho

Tendo em conta todo o contexto da produção de cana-de-açúcar no Brasil e geração do bagaço da cana-de-açúcar e a importância da correta destinação desse resíduo contribuindo para um desenvolvimento sustentável, esse trabalho objetiva desenvolver um processo de confecção de um material para condicionamento acústico baseado no uso do colmo do bagaço da cana-de-açúcar, e os aditivos necessários para sua conservação e composição. Serão produzidas amostras com diferentes aditivos e espessuras a fim de se obter a composição e configuração que apresentem o melhor comportamento de condicionamento acústico. Para obtenção dos coeficientes de absorção sonora será utilizado um tubo de impedância e as medições seguirão as orientações da norma ISO 10534-2. Como base comparativa para avaliação da eficiência do produto gerado, serão utilizados painéis para condicionamento acústico já existentes no mercado.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. No primeiro capítulo está a introdução, onde é apresentado o enquadramento geral do tema e os objetivos que norteiam esta dissertação. A fundamentação teórica, no segundo capítulo, consiste em um breve estudo de conceitos relacionados à acústica e absorção sonora. Já o terceiro capítulo, a revisão bibliográfica, apresenta, sucintamente, estudos e trabalhos sobre materiais de traços porosos e fibrosos e fibras naturais, onde se enquadra a fibra da cana-de-açúcar. Os capítulos 2 e 3 servem como embasamento para o desenvolvimento do trabalho.

O quarto capítulo engloba a metodologia, na qual foram detalhados os materiais, o processo de preparação das amostras, a instrumentação e os procedimentos de medição do coeficiente de absorção sonora.

A análise e discussão dos resultados é realizada no quinto capítulo. Na sequência constam as conclusões, apresentadas no sexto capítulo e, por fim, as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definição de Som e Ruído

Bistafa (2018) define som como sensação produzida no sistema auditivo e ruído como um som indesejável, de conotação negativa. E complementa que sons são vibrações das partículas do ar que se propagam a partir de estruturas vibrantes.

Isbert (1998) possui uma definição similar para som, mencionando que o som pode ser definido de muitas maneiras diferentes e que as mais comuns são:

- Vibração mecânica propagando-se através de um meio de material denso e elástico (geralmente ar), e que é capaz de produzir uma sensação auditiva;
- Sensação auditiva produzida por uma vibração mecânica que se propaga por um meio elástico e denso.

Ao contrário da luz, o som não se propaga no vácuo pois necessita das partículas do meio para transportar energia.

Mesmo considerando o ruído como som indesejável, a sua completa eliminação geralmente não é o objetivo, além de apresentar um alto custo. De facto, dormir em um local totalmente silencioso pode ser perturbador. Além disso, o ruído pode transmitir informações úteis como indicar a velocidade em que dirigimos ou que o café na cafeteira automática está pronto, e até mesmo ser parâmetro para aquisição de um produto que é mais silencioso do que o do concorrente, complementa Bistafa (2018).

Diante de tudo o que foi exposto, geralmente, o objetivo na aplicação de soluções acústicas é o controle do ruído e não a sua completa eliminação.

2.2 Geração e Propagação do Som

O elemento que gera o som é chamado de fonte sonora. As fontes sonoras podem ser de diversos tipos e origens: de máquinas e equipamentos, do homem, da natureza, etc. Isbert (1998) explica que geração do som ocorre quando a referida fonte entra em vibração. E esta é transmitida às partículas de ar adjacentes, que, por sua vez, a transmitem a novas partículas contíguas e assim sucessivamente.

Isbert (1998) complementa que as partículas não se movem com a perturbação, elas simplesmente oscilam em torno da sua posição de equilíbrio. A forma como a perturbação se move de um lugar para outro é chamada de propagação de ondas sonoras.

Ondas sonoras planas ocorrem em situações muito particulares, como por exemplo no interior de um duto com diâmetro menor do que o comprimento de onda. A propagação mais representativa dos sons que ouvimos no dia a dia se dá na forma de ondas esféricas, explica Bistafa (2018). As ondas sonoras se propagam a partir de uma fonte pontual e em sua trajetória podem encontrar obstáculos, que podem ser: a temperatura, o vento, uma árvore, uma parede, dentre outros, e eles influenciam na propagação da onda e em seu alcance.

Na acústica é importante entender a fonte de emissão sonora e classificar a qualidade desses sons para que possam ser tratados e até mesmo isolados, quando necessário.

Segundo Isbert (1998), a forma mais comum de expressar quantitativamente a magnitude de um campo sonoro é por meio da pressão sonora. A Figura 2.1 mostra a evolução da pressão P_T , em função do tempo, em um ponto localizado a qualquer distância da fonte sonora. Esta pressão é obtida como soma da pressão atmosférica estática P_0 e da pressão associada à onda sonora p .

Continuando o entendimento tendo como referência Isbert (1998), aumentos e diminuições periódicas da pressão sonora são observados em torno de seu valor de equilíbrio, correspondendo à pressão atmosférica estática P_0 . Essas variações estão associadas aos processos de compressão e expansão. O valor máximo da oscilação em relação a P_0 é denominado amplitude da pressão associada à onda sonora e é representado pela letra P .

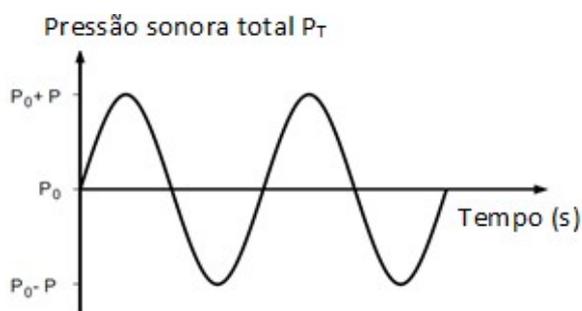


Figura 2.1 – Evolução da pressão sonora total P_T em função do tempo em um ponto qualquer do espaço (adaptado de Isbert, 1998)

2.3 Frequência (f) do Som

Isbert (1998) define frequência (f) do som como o número de oscilações por segundo da pressão sonora p e a frequência é medida em hertz (Hz) ou ciclos por segundo (c/s). A frequência do som coincide com a frequência da vibração mecânica que o gerou.

A Figura 2.2 traz dois exemplos de pressão sonora p associada a oscilações de diferentes frequências.

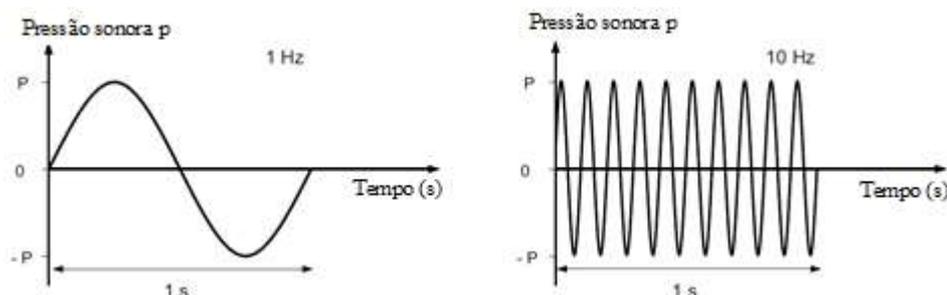


Figura 2.2 – Exemplos de oscilações nas frequências 1Hz e 10Hz (adaptado de Isbert, 1998)

2.4 Impedância Acústica Específica

Bistafa (2018) define impedância acústica específica (z) como a razão entre a pressão sonora e a velocidade das partículas que, durante o movimento vibratório, deslocam-se da posição de equilíbrio com uma certa velocidade.

A impedância acústica específica depende do meio de propagação e do tipo de onda presente (onda plana, esférica, etc.). Para ondas planas e para ondas esféricas com simetria esférica, a impedância acústica específica é obtida conforme a equação (1),

$$z = \rho c \quad (1)$$

onde ρ é a massa volúmica e c é a velocidade de propagação no meio, sendo ρc a impedância característica do meio de propagação. A quantidade ρc é mais relevante em acústica do que ρ e c individualmente, comenta Bistafa (2018).

2.5 Absorção Sonora

Bistafa (2018) explica que o coeficiente de absorção sonora (α) é a medida da capacidade de uma superfície em absorver som. Ele é definido pela equação (2), a seguir:

$$\alpha = \frac{E_{absorvida}}{E_{incidente}} = \frac{E_{incidente} - E_{refletida}}{E_{incidente}} = 1 - \frac{E_{refletida}}{E_{incidente}} \quad (2)$$

onde:

$E_{absorvida}$ é a energia sonora absorvida ($E_{absorvida} = E_{dissipada} + E_{transmitida}$);

$E_{refletida}$ é a energia sonora refletida; e

$E_{incidente}$ é a energia sonora incidente.

A Figura 2.3, abaixo, traz a representação de quando o som incide sobre uma superfície e uma parte da energia sonora é refletida, enquanto a outra parte, a qual desaparece atrás da superfície, se compõe de 2 parcelas: a energia sonora dissipada e a energia sonora transmitida pela parede.

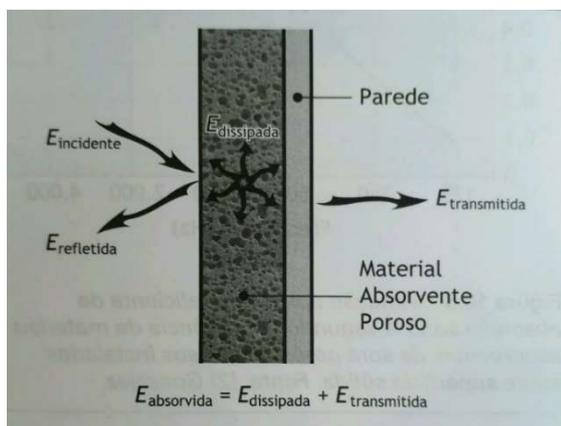


Figura 2.3 - Balanço energético do som que incide sobre uma superfície (Bistafa, 2018)

Bistafa (2018) complementa sua explanação colocando que o coeficiente de reflexão sonora (ρ) é definido pela equação (3):

$$\rho = \frac{E_{refletida}}{E_{incidente}} \quad (3)$$

E, dadas as 2 equações acima apresentadas, verifica-se que: $\alpha = 1 - \rho$. Assim, $\alpha = 1$ e $\rho = 0$ para uma superfície totalmente absorvente ($E_{refletida} = 0$); e $\alpha = 0$ e $\rho = 1$ para uma superfície totalmente refletora ($E_{refletida} = E_{incidente}$).

Bistafa (2018) exemplifica a absorção sonora dizendo que uma janela é um excelente absorvedor de som, uma vez que toda a energia incidente escapa pela janela, ou seja, nenhuma energia sonora é refletida. Nesse cenário, o coeficiente de absorção sonora para a janela aberta

é $\alpha = 1$, ou seja, janelas abertas apresentam o máximo valor possível do coeficiente de absorção sonora. Porém, não se utiliza janelas abertas para absorver som em recintos. Nessa situação são aplicados materiais ditos absorventes acústicos, que fazem uso da energia dissipada na sua estrutura para absorver o som.

A Tabela 2.1, abaixo, fornece coeficientes de absorção sonora, em bandas de oitava, de materiais e de revestimentos de superfícies geralmente utilizados em edifícios.

Tabela 2.1 - Coeficientes de absorção sonora de materiais e de revestimentos de superfícies (Bistafa, 2018)

Material	Frequência central da banda de oitava (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Alvenaria de tijolos aparentes não pintados	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Alvenaria de tijolos aparentes pintados	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Reboco liso sobre alvenaria de tijolos ou blocos	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Alvenaria de blocos aparentes pintados	0,01	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Reboco ou gesso rústico sobre quaisquer alvenarias	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03
Reboco ou gesso desempenado sobre quaisquer alvenarias	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Concreto ou cimentado liso desempenado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Concreto aparente, tratado e polido	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Azulejos ou pastilhas	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Mármore, cerâmica ou granito polido	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Painel de cortiça sobre qualquer alvenaria	0,05	0,05	0,05	0,08	0,10	0,13
Assoalho em tábua corrida, com espaço livre até o contrapiso	0,40**	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Tacos de madeira colados sobre contrapiso	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Carpete tipo forração simples, colado sobre contrapiso	0,05	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
Carpete tipo forração alto-tráfego	0,05	0,10	0,15	0,30	0,50	0,55
Carpete de náilon de 6 mm sobre manta de feltro	0,05	0,10	0,10	0,30	0,40	0,50
Carpete de náilon de 10 mm sobre manta de feltro	0,05	0,15	0,30	0,40	0,50	0,60
Carpete tipo forração simples, colado sobre contrapiso	0,05	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
Paviflex ou plurigoma, colado sobre contrapiso desempenado	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Cortina de tecido leve, esticada, em contacto com a parede	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina de tecido médio, drapeada, em 50% da área	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Cortina de tecido pesado, drapeada, em 50% da área	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Superfície de água (piscinas, espelhos d'água etc.)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Vidro fixo, temperado ou laminado, com grande superfície	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Vidro comum montado em caixilho	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Divisória de gesso tipo <i>dry-wall</i> com ou sem enchimento	0,10	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03
Divisória de lambris de madeira compensada	0,58	0,22	0,07	0,04	0,03	0,07
Lambris tipo macho-fêmea, contra a parede	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Forro de gesso acartonado com ou sem enchimento	0,10	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03
Assoalho em tábua corrida sobre contrapiso	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Porta de madeira comum, pintada ou envernizada	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Porta acústica, com faces de madeira, pintadas ou envernizadas	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07

*Valores indicativos. Utilizar sempre coeficientes de absorção sonora fornecidos pelo fabricante.

** Observação: os valores em **negrito** se devem provavelmente à absorção sonora de "painel ressonante".

Já a Tabela 2.2, abaixo, apresenta coeficientes de absorção sonora, em bandas de oitava, de materiais fibrosos e porosos encontrados no mercado. Essas informações servirão de comparativo, no final desse trabalho, em relação aos coeficientes de absorção sonora obtidos do material para condicionamento acústico baseado no uso do colmo do bagaço da cana-de-açúcar.

Tabela 2.2 - Coeficientes de absorção sonora de materiais porosos/ fibrosos (Bistafa, 2018)

TABELA 10.1 Coeficientes de absorção sonora de materiais porosos/fibrosos*													
Material					Frequência central da banda de oitava (Hz)						NRC		
					125	250	500	1.000	2.000	4.000			
Fibroso	Isover – Santa Marina Placa de lã de vidro aglomerado	Densidade (kg/m ³)	30	Espessura (mm)	25	0,08	0,27	0,50	0,87	0,98	1,04	0,66	
			60		50	0,17	0,62	0,90	1,08	1,07	0,97	0,92	
		Thermax – RockFibras Manta de lã de rocha basáltica	Densidade (kg/m ³)	32	Espessura (mm)	25	0,05	0,27	0,68	0,94	1,03	1,05	0,73
				64		50	0,13	0,75	0,96	1,03	0,88	0,96	0,91
	Espumex – Acústica São Luiz Espuma flexível de poliuretano poliéster incombustível		Densidade (kg/m ³)	32	Espessura (mm)	50	0,35	0,48	0,74	0,88	0,91	0,96	0,75
				64		100	0,85	0,98	1,10	1,11	1,09	1,18	1,07
		Sonex – Illbruck Espuma flexível de poliuretano poliéster (com retardadores de chama) densidade: 32 kg/m ³	Densidade (kg/m ³)	32	Espessura (mm)	50	0,50	0,59	0,91	1,05	1,06	1,06	0,90
				64		100	0,87	1,23	1,19	1,15	1,12	1,10	1,17
Poroso	Espumex – Acústica São Luiz Espuma flexível de poliuretano poliéster incombustível		Densidade (kg/m ³)	32	Espessura (mm)	40	0,06	0,19	0,38	0,52	0,48	0,65	0,39
						60	0,10	0,28	0,49	0,53	0,47	0,82	0,44
		70				0,15	0,42	0,75	0,74	0,66	0,95	0,64	
		75				0,15	0,50	0,90	0,99	1,00	1,00	0,85	
	Sonex – Illbruck Espuma flexível de poliuretano poliéster (com retardadores de chama) densidade: 32 kg/m ³	Densidade (kg/m ³)	32	Espessura (mm)	20	0,04	0,12	0,28	0,44	0,60	0,73	0,36	
					35	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89	0,58	
					50	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01	0,72	
					75	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00	0,89	

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

Na pesquisa de Carvalho (2019), ela faz referência a uma tabela com análise do coeficiente de absorção sonora de fibras brutas, sem aglutinantes, conforme pode ser visto na Tabela 2.3. Essa informação pode colaborar para análise dos resultados do coeficiente de absorção do colmo do bagaço da cana-de-açúcar.

Tabela 2.3 – Coeficientes de absorção sonora de fibras brutas (Carvalho, 2019)

Material	Espessura [m]	Frequência [Hz]					NRC	
		125	250	500	1000	2000		
Kenaf	(Leve)	0,06	0,09	0,19	0,33	0,68	0,90	0,55
	(Denso)	0,04	0,08	0,18	0,32	0,70	0,94	0,55
	(Denso)	0,06	0,10	0,30	0,61	0,99	0,95	0,70
Madeira	(Fibras)	0,06	0,20	0,40	0,50	0,65	0,91	0,60
	(Mineralizada)	0,03	0,05	0,10	0,10	0,20	0,40	0,20
Cânhamo		0,03	0,01	0,15	0,25	0,51	0,70	0,40
Coco		0,05	0,10	0,20	0,34	0,67	0,79	0,50
		0,10	0,25	0,42	0,83	0,81	0,94	0,75
Cortiça		0,03	0,01	0,02	0,10	0,30	0,86	0,30
Cana	(Misturado)	0,04	0,05	0,10	0,35	0,54	0,58	0,40
	(Misturado)	0,08	0,10	0,21	0,56	0,52	0,68	0,50
	(Só casca)	0,04	0,10	0,12	0,38	0,64	0,62	0,45
	(Só casca)	0,08	0,10	0,26	0,63	0,54	0,89	0,60
Papelão		0,10	0,10	0,27	0,48	0,54	0,66	0,50
Lã de ovelha		0,04	0,10	0,14	0,36	0,73	0,94	0,55
		0,06	0,15	0,28	0,66	0,95	0,94	0,70

2.6 Materiais Absorventes

Isbert (1998) explica que a absorção sofrida pelas ondas sonoras ao incidir sobre diferentes tipos de materiais absorventes, bem como a sua dependência em função da frequência, varia de um material para outro. Para melhor escolha de qual o material a utilizar, é importante entender o comportamento sonoro do ambiente que se pretende tratar.

Os materiais absorventes comumente encontrados no mercado são fibrosos, como lã de vidro e lã de rocha, ou porosos, a exemplo de espumas de poliuretano. Bistafa (2018) relata que materiais absorventes são leves e não possuem características estruturais.

Os materiais absorventes geralmente são utilizados para atingir algum desses objetivos, segundo Isbert (1998):

- Obter tempos de reverberação mais adequados, dependendo da atividade (ou atividades) para a qual o espaço a ser projetado é planejado;
- Prevenção ou eliminação de ecos;

- Redução do tempo de reverberação em espaços ruidosos (restaurantes, fábricas, estações, etc.)

Os materiais absorventes possuem canais através dos quais as ondas sonoras podem penetrar. A dissipação de energia na forma de calor ocorre quando as ondas entram em contato com as paredes desses canais. As ondas sonoras incidentes são parcialmente refletidas. A energia sonora não refletida penetra no material, é atenuada e atinge sua superfície novamente após ser refletida na parede rígida traseira e esse processo continua indefinidamente. Quanto maior for o número de canais, maior será a absorção produzida, explica Isbert (1998).

Bistafa (2018) complementa bem essa descrição afirmando que um bom absorvente de som é um material que “respira”, ou seja, o material que permite às partículas de ar penetrarem e se movimentarem em seu interior.

Os materiais absorventes podem ser classificados como:

- Porosos e fibrosos, cuja melhor eficácia é observada nas altas frequências;
- Ressonadores, mais eficazes nas médias frequências; e
- Membranas, cuja melhor eficácia se observa nas baixas frequências.

É importante destacar que, para que materiais porosos/ fibrosos adquiram toda sua capacidade de dissipar energia sonora, eles deverão ser aplicados sobre uma superfície sólida, por exemplo, fixados sobre a parede de um recinto. Nesse cenário, a onda refletida se combina com a onda incidente, gerando uma onda estacionária na frente da parede que interage com o material absorvente, provocando a dissipação por atrito, explica Bistafa (2018). A Figura 2.3, no item anterior, representa bem o cenário descrito neste parágrafo.

A Figura 2.4, abaixo, representa a curva típica do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes porosos/ fibrosos instalados sobre uma superfície sólida.

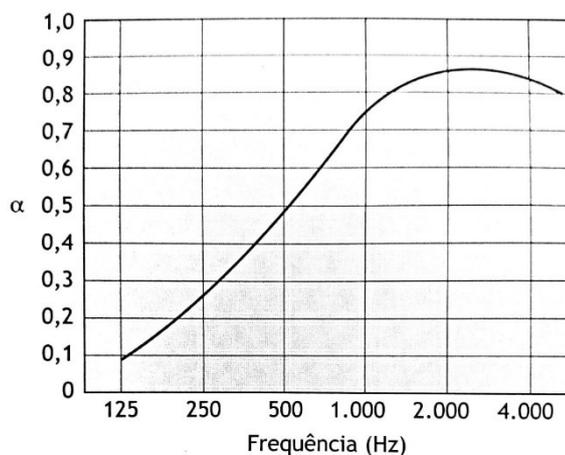


Figura 2.4 – Variação típica do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes porosos/ fibrosos sobre superfície sólida. (Bistafa, 2018)

Características físicas dos materiais absorventes porosos/ fibrosos influenciam a curva do coeficiente de absorção sonora do material. Bistafa (2018) relata que, geralmente, α aumenta segundo a espessura e a densidade de materiais porosos/ fibrosos. A Figura 2.5, demonstra a variação nas curvas do coeficiente de absorção sonora do material sob influência de fatores como: espessura, densidade, camada de ar e aplicação de tinta.

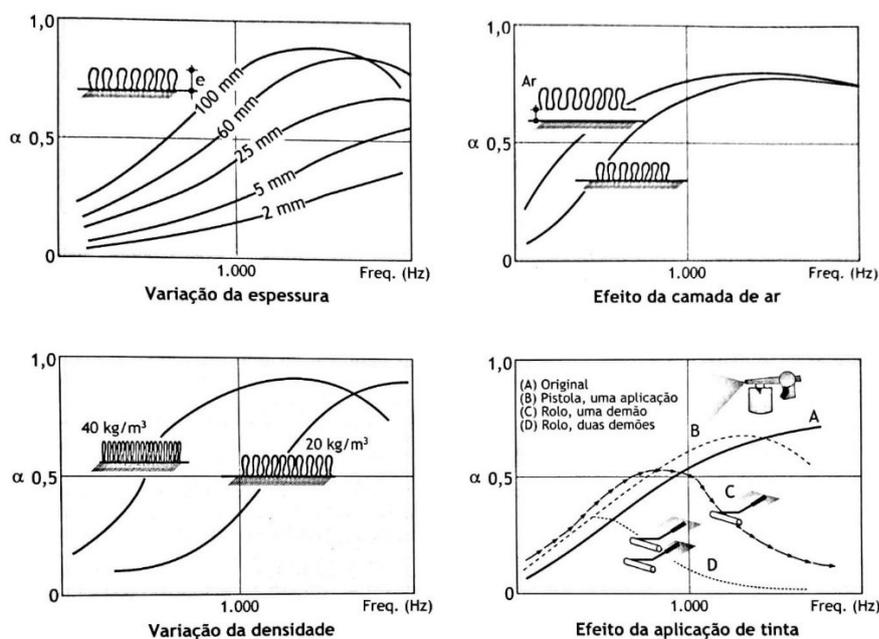


Figura 2.5 – Fatores que influenciam a absorção sonora de materiais porosos/ fibrosos. (Bistafa, 2018)

Bistafa (2018) recomenda que a espessura de materiais absorventes aplicados diretamente sobre superfícies sólidas seja de, pelo menos, um décimo do comprimento de onda do som incidente. Ou seja, com uma frequência de 1.000 Hz, o comprimento de onda é de aproximadamente 34 cm, logo a espessura do material absorvente deve ser de, pelo menos, 3,4 cm.

Na busca de um melhor condicionamento acústico, além da análise quanto à espessura do material e sua densidade, cabe avaliar o afastamento do material da superfície de uma parede/teto. Bistafa (2018) comenta que o afastamento do material da superfície sólida tende a aumentar a absorção sonora, principalmente nas baixas frequências.

Bistafa (2018) menciona que, geralmente, materiais porosos/ fibrosos apresentam baixos coeficientes de absorção sonora nas baixas frequências, trazendo, como alternativa, a instalação do material afastado de $\lambda/4$ da superfície. Para exemplo, Bistafa (2018) relata que, para aumentar a absorção sonora na banda de oitava de 125 Hz, a distância da superfície deveria ser de 68 cm, considerando a equação (4):

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{340}{4 \times 125} = 0,68 \text{ m} = 68 \text{ cm} \quad (4)$$

De fato, trata-se de uma distância considerável para aplicação do material afastado da parede. Distâncias além dessa grandeza costumam ser aplicadas preferencialmente em tetos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais de Traços Porosos ou Fibrosos

No item 2.6 do capítulo anterior foram referidos os materiais absorventes, e agora será explorado um pouco mais sobre as principais características que definem a capacidade de absorção acústica dos materiais de traços porosos ou fibrosos, com foco em fibras naturais.

A crescente demanda por materiais sustentáveis e ecológicos vem incentivando o desenvolvimento das fibras naturais como materiais alternativos para condicionamento acústico. Isso está associado, principalmente, aos benefícios ambientais e econômicos, além do avanço no desenvolvimento tecnológico que tem contribuído para o reaproveitamento e beneficiamento desses materiais.

Em um futuro breve, acredita-se que a tendência será os materiais de origem sintética perderem espaço frente aos materiais de origem natural provenientes de fontes renováveis, já que os materiais de origem sintética não são biodegradáveis, poluem o meio ambiente e seu processo produtivo contribui significativamente para a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e, conseqüentemente, para o aquecimento global. Alguns países desenvolvidos têm disponibilizado incentivos para o desenvolvimento sustentável, principalmente após as metas estabelecidas em 1997 através do acordo do protocolo de Kyoto, o que fortalece ainda mais o interesse por materiais de origem natural.

Como já vem sendo dito ao longo desta dissertação, existe espaço para pesquisas focadas no desenvolvimento de materiais acústicos baseados em recursos renováveis ou na reutilização de resíduos que já estão se mostrando alternativas viáveis aos materiais convencionais.

3.1.1 Materiais Porosos

Materiais porosos se caracterizam por possuir apenas parte do volume preenchido por matéria sólida, sendo o restante constituído por cavidades, canais ou interstícios para que as ondas sonoras possam passar por eles. Materiais porosos geralmente possuem um alto valor de coeficiente de absorção de energia, sendo mais eficientes nas altas frequências. A Figura 3.1, abaixo, ilustra alguns tipos de materiais porosos e a sua estrutura.

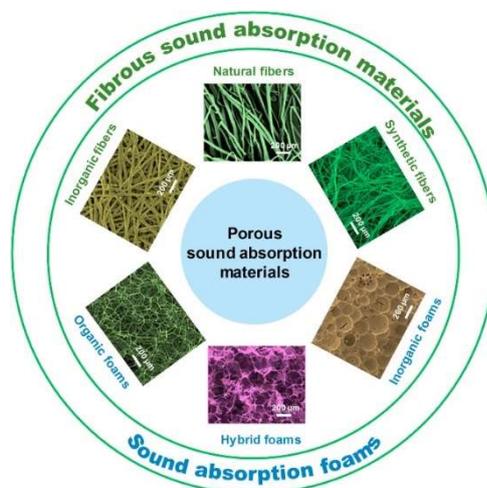


Figura 3.1 – Tipos de materiais porosos e sua estrutura (Cao et al, 2018)

A porosidade, resistividade ao fluxo de ar e tortuosidade são parâmetros utilizados para caracterização acústica desse tipo de material. A porosidade é definida como a razão entre o volume de ar no espaço vazio da amostra e o seu volume total; por sua vez, a resistência ao fluxo de ar é a resistência experimentada pelo ar ao passar pelos poros abertos do material; já a tortuosidade ou "fator da forma", é uma medida da forma das passagens vazias de ar (que podem ser quase retas ou torcidas/ sinuosas) e o efeito que isso tem sobre as propriedades de absorção do som desse material.

Segundo Bistafa (2018), materiais cujos tecidos possuem trama muito estreita, que não permitem que o ar os atravesse, são ineficazes, tal como aqueles que apresentam trama muito esparsa, que permitem enxergar através deles.

3.1.2 Materiais Fibrosos

Os materiais fibrosos apresentam características favoráveis para absorção sonora dado que são compostos por um conjunto de filamentos contínuos que prendem o ar entre eles. A dissipação da energia sonora resulta, basicamente, por efeitos viscosos causados pelo atrito entre as moléculas de ar e a parede dos poros, e perdas térmicas causadas pela transferência de calor entre diferentes fibras.

O coeficiente de absorção sonora ideal pode ser alcançado escolhendo as fibras naturais com propriedades físicas adequadas, tendo em conta que um dos parâmetros mais importantes de uma fibra está relacionado com o seu diâmetro. O diâmetro da fibra está diretamente

relacionado com as características de absorção de som do material, porém outras características como densidade e espessura também devem ser consideradas.

As propriedades de absorção de som obtidas por fibras naturais são semelhantes, e algumas vezes superiores, às fibras sintéticas, incluindo as espumas. E essas propriedades podem ser aprimoradas e otimizadas ao longo do seu processo de fabricação, ou até mesmo na busca de uma melhor experiência acústica com a combinação de diferentes fibras naturais.

3.2 Fibras Naturais

Segundo Bastos (2009), fibras naturais são fibras retiradas prontas da natureza. Podem ser consideradas materiais finos e alongados, como filamentos, que podem ser contínuos ou cortados. As fibras mais comuns são o algodão, a lã, a seda, o linho e o rami, todas fibras vegetais. As fibras vegetais já foram amplamente utilizadas na manufatura, mas em meados do ano de 1960 elas foram gradativamente substituídas pelas espumas de poliuretano, devido principalmente à maior produtividade na manipulação do material e ao menor custo da espuma.

Bastos (2009) continua explicando que, mais recentemente, as indústrias voltaram a ter interesse nas fibras vegetais e alguns dos fatores para tal interesse é de que as fibras vegetais são renováveis, biodegradáveis, de baixo custo, mais leves e possuem maior perspirabilidade – capacidade de absorver umidade proveniente da transpiração humana.

Além disso, o volume de resíduo gerado no processamento do produto principal de alguma dessas fibras é significativo e um reaproveitamento do mesmo é muito bem visto.

Na literatura, encontramos diversos estudos sobre o uso de fibras naturais para confecção de material para tratamento acústico, tais como: cortiça, fibra da casca de coco, fibra da bananeira, fibra do bambu, dentre outros. Alguns desses estudos já comprovaram a eficiência de alguns materiais para fins de condicionamento acústico, inclusive em comparação com materiais mais comuns no mercado (lã de rocha, lã de vidro, etc.).

Nesse estudo, o foco será o uso do colmo do bagaço da cana-de-açúcar para tal fim, mas também será abordado um pouco sobre a fibra da casca de coco, com o intuito de comparar os resultados da capacidade de absorção sonora entre as duas fibras.

3.2.1 Fibra da Cana-de-açúcar

Rodrigues e Ross (2020) explicam que a cana cresce em forma de touceiras e o colmo é a sua parte principal. O colmo tem forma cilíndrica, é separado por nós e pode chegar a 6m de altura em algumas variedades de cana. A composição química do colmo de uma cana madura, normal e sadia é, em média, 70% de água, 15% de fibras (bagaço), 13% de sacarose (açúcar) e 2% de substâncias diversas. A Figura 3.2, abaixo, ilustra uma representação da estrutura do colmo da cana-de-açúcar.

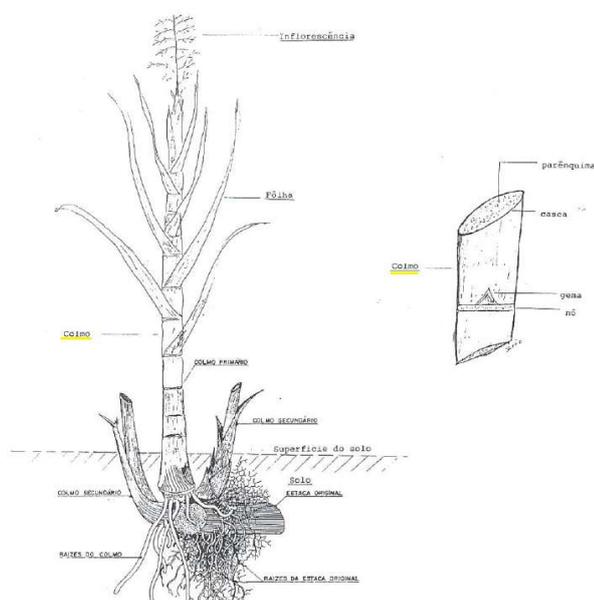


Figura 3.2 - Figura adaptada da constituição da cana-de-açúcar, destacando o colmo (Oliveira, 2013)

O bagaço é o subproduto fibroso da cana-de-açúcar, decorrente do esmagamento da cana. O bagaço representa de 25% a 30% do peso da cana moída; em larga escala, 1 tonelada de cana processada gera em torno de 250 a 280 kg de bagaço, segundo Rodrigues e Ross (2020).

Yano et al (2017), em seu artigo, citam que o bagaço da cana-de-açúcar é um material complexo, formado por polímeros naturais, compostos de celulose e hemicelulose, e possui uma composição de fibras de bagaço seco. E que, comparada a outras fibras, apresenta menor resistência à tração e menor elasticidade, além de maior humidade e melhor degradabilidade.

Na literatura, é possível encontrar um volume considerável de pesquisas em torno do reaproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar, muitas delas visando a eficiência desse material

na aplicação de soluções para condicionamento acústico. A título de conhecimento, podemos citar pesquisas dos autores Yano et al (2017), Debatin et al (2018), Battistelle et al (2008), Outa (2014) e Outa et al (2017) e que estão sendo usados como referência para construção dessa dissertação.

O que chama a atenção nesse material para fins de condicionamento acústico são características como: ser um material fibroso, com boas propriedades mecânicas e densidade. Além disso, no território brasileiro, trata-se de um subproduto em abundância.

3.2.2 Fibra da Casca de Coco

Albuquerque et al (2012/2013) explicam que o coco é um material de difícil degradação quando lançado ao solo, levando até 8 anos para sua total decomposição, além de ser um vetor de foco e proliferação de doenças enquanto está exposto. Logo, é de suma importância encontrar formas de agregar valor aos resíduos do coco, reduzindo os impactos negativos no meio ambiente, saúde das pessoas, além de proporcionar emprego e renda.

Várias pesquisas têm sido realizadas com a fibra da casca de coco objetivando diversas aplicações. Citando algumas, temos as de autores como Albuquerque et al (2012/2013) e Ramis et al. (2014), onde ambas citam que essa fibra possui propriedades interessantes no que diz respeito à sua aplicação na construção civil, assim como para condicionamento acústico, dado que esse material tem apresentado bons coeficientes de absorção sonora.

Albuquerque et al (2012/2013) complementam que a fibra da casca de coco é multicelular, pertencendo à família das fibras duras e é constituída principalmente por celulose e lenho. Além disso, possui alta resistência mecânica, durabilidade e resiliência. Sob a forma de painéis, a fibra de coco apresenta características como: resistência à humidade, não apodrece, não atrai roedores, não produz fungos, é inodora e possui comportamento a fogo da classe B2.

Na Figura 3.3, abaixo, apresenta-se o resultado da pesquisa realizada por Albuquerque et al (2012/2013), sendo possível observar um índice de absorção sonora que chegou a 40% ($\alpha = 0,40$) na frequência ótima de 1072 Hz, o que ratifica a capacidade de absorção sonora de tal material. É importante mencionar que existem diferentes tipos de fibra de casca de coco e que, obviamente, elas não terão o mesmo índice de absorção sonora; mesmo assim, a fibra de casca de coco tem-se mostrado um material promissor para aplicação em painéis de condicionamento acústico.

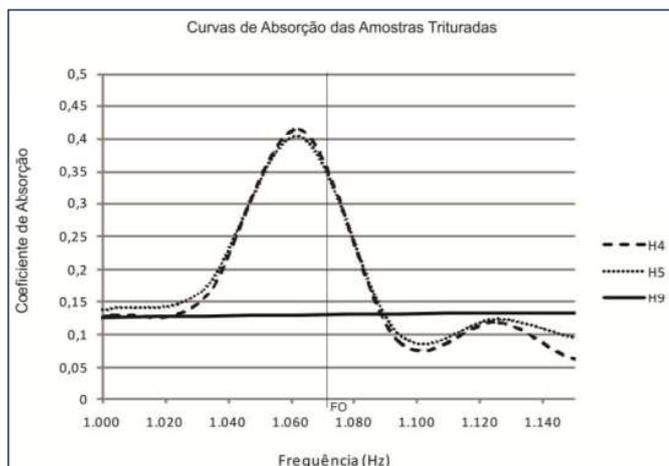


Figura 3.3 - Gráfico representando a absorção sonora da fibra da casca de coco (Albuquerque et al, 2012/2013)

Em complementação aos dados apresentados no parágrafo anterior, a Figura 3.4 mostra as curvas de absorção sonora da fibra da casca de coco, obtidas através de ensaios mais recentes, sendo uma delas desenvolvida para comercialização. Estes mesmos resultados serão usados novamente mais a frente, quando serão comparados com outros materiais, incluindo a fibra do colmo do bagaço da cana-de-açúcar.

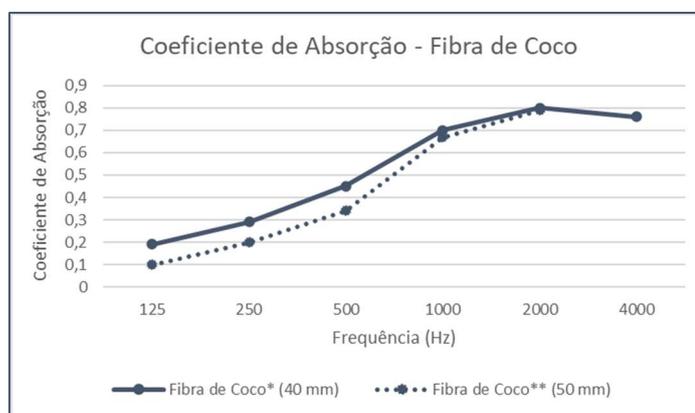


Figura 3.4 - Gráfico representando a absorção sonora da fibra da casca de coco adaptado de *(Coco Verde@) e **(Carvalho, 2019)

4 METODOLOGIA

Este capítulo traz o detalhamento das características da fibra que compõe o colmo do bagaço da cana-de-açúcar, os equipamentos, os dispositivos, o método utilizado para fabricação das amostras e, por fim, a instrumentação, os procedimentos e normas empregados na realização dos ensaios de absorção sonora.

4.1 Materiais

4.1.1 Matéria-Prima

O bagaço in natura da cana-de-açúcar foi obtido junto a comerciantes em feira livre, localizada no município de Guarapari, estado do Espírito Santo / Brasil. Nestes locais, a cana-de-açúcar é comercializada com a finalidade da extração do seu caldo para consumo. O processo de extração do caldo consiste na passagem da cana através de dois ou mais rolos de uma moenda, com pequenas folgas entre eles, exercendo uma pressão mecânica sobre a cana. Como subproduto desse processo, temos o bagaço in natura da cana-de-açúcar, que geralmente é descartado. Sendo assim, o bagaço foi cedido sem incorrer em custos de aquisição. A Figura 4.1, representa o bagaço in natura da cana-de-açúcar após a moagem.



Figura 4.1 - Bagaço da cana-de-açúcar após a moagem para extração do caldo (Autor)

A espécie de cana-de-açúcar utilizada nessa pesquisa é a *Saccharum officinarum*. Essa espécie tem como característica colmos grossos, elevado teor de açúcar e baixo teor de fibras.

Para fins de conhecimento, o caldo da cana-de-açúcar é rico em minerais e vitaminas, como ferro, sódio, cobre, cálcio, fósforo, manganês, potássio, vitaminas do complexo B e vitamina C.

4.1.2 Aditivos e Adesivo

4.1.2.1 Retardante de Chamas para Fibras Naturais

Foi adquirido, com recursos próprios, um (01) galão de 5 L (litros) de solução retardante de chamas para fibras naturais. Segundo informações técnicas do fabricante, o produto é certificado e ensaiado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de acordo com o ensaio da NBR 9442/86 aprovado com Classificação “A” no teste de propagação de chamas. E, pela SRI (Índice de Reflexão Solar) no teste ASTM E 662 - Determinação da densidade óptica específica de fumaça - Índice Dm: 72 – 94 (<450), atingindo Classe IIA conforme IT 10.

4.1.2.2 Preservante contra Fungos e Insetos

Foi adquirido, com recursos próprios, um (01) litro de solução preservante contra fungos e insetos. O produto faz parte do grupo químico fenil pirazol, cuja composição é fipronil 0,020% p/p, benzoato de denatonium 0,001% p/p, veículos e inertes q.s.p 100% p/p.

4.1.2.3 Cola Adesiva

Foi adquirido, com recursos próprios, dois (02) litros de adesivo cola a base de água, cuja composição é resina de P.V.A. (Poliacetato de Vinila) e água.

4.1.3 Equipamentos e Dispositivos

Todos os equipamentos e dispositivos mencionados nessa seção foram adquiridos com recursos próprios.

4.1.3.1 Prensa Hidráulica com Manômetro de Precisão

Prensa hidráulica com capacidade de 10 t (toneladas), fabricante: Bovenau, modelo: P10000. Em função da alta capacidade da prensa, foi necessário adquirir um manômetro de menor escala, para garantir precisão durante a prensagem das amostras. Manômetro fabricante: MACVAL, glicerinado, escala: 0 a 160 kgf/cm², NBR 14105.

4.1.3.2 Paquímetro Digital

Paquímetro digital, fabricante: Mitutoyo, série: 500, modelo: Digital ABSOLUTE AOS. Capacidade: 200mm/8", resolução/ graduação: 0,01mm/.0005", exatidão: $\pm 0,02$ mm.

4.1.3.3 Balança Digital de Precisão

Balança digital de alta precisão, modelo: I-2000 com capacidade de 3000g e resolução de 0.1g.

4.1.3.4 Outros Equipamentos e Dispositivos Utilizados

- Furadeira com jogo de serra copo
- Arco de serra de 8"
- Lâmina de corte facão
- Tubos de PVC. 2 m (metros) de tubo com diâmetro (\emptyset) externo de 32 mm, e 2 m de tubo com \emptyset externo de 101 mm
- Peneira em malha de aço galvanizado com abertura de 35 mm
- Peneira em malha de aço galvanizado com abertura de 2,79 mm

4.2 Análise de Microscópica Eletrônica de Varredura (MEV) da Fibra do Colmo do Bagaço da Cana-de-açúcar

A realização da análise pelo método da microscopia eletrônica de varredura (MEV) teve como objetivo observar as características superficiais dos traços da fibra in natura do colmo do bagaço da cana-de-açúcar. As imagens foram obtidas sem a devida metalização da amostra e a falta de condutividade no material compromete a qualidade das imagens, dificultando a visualização e análise das características dos traços da fibra.

As Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente, representam a amostra do colmo do bagaço da cana-de-açúcar enviada ao laboratório e parte da amostra retirada para geração das imagens.



Figura 4.2 - Amostra do bagaço da cana de açúcar enviado ao laboratório (Autor)



Figura 4.3 - Extrato da amostra analisada (Autor)

A seguir, as Figuras 4.4 e 4.5 apresentam as imagens da amostra acima obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

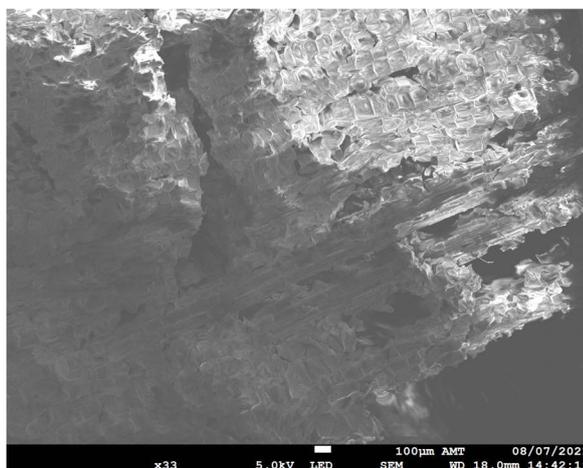


Figura 4.4 - Bagaço da cana-de-açúcar, MEV, 33x (Autor)

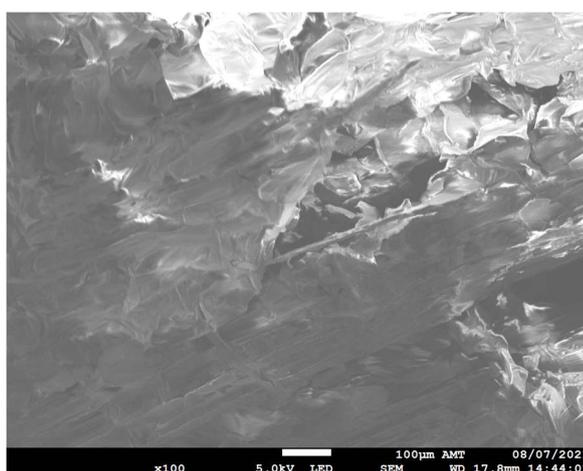


Figura 4.5 - Bagaço da cana-de-açúcar, MEV, 100x (Autor)

4.3 Processo de Preparação das Amostras do Aglomerado do Colmo do Bagaço da Cana-de-Açúcar

O plano de trabalho inicial previa a conformação das amostras a partir de placas/ painéis que seriam fabricados com o auxílio de uma fôrma em madeira de lei, medindo 350 mm x 250 mm. Após a etapa de secagem final, as amostras seriam cortadas em suas devidas dimensões, com auxílio de um dispositivo mecânico tipo vazador.

Porém, ao perceber a resistência da fibra ao corte mecânico, concluiu-se que, seguir o processo originalmente planejado poderia deformar as amostras durante o corte. Principalmente as amostras de maior espessura. Diante desse cenário, optou-se por gerar moldes para

conformação das amostras, sob medida, utilizando tubos em PVC, com fundo e tampa em madeira, conforme Figuras 4.6, 4.7 e 4.8.



Figura 4.6 – Molde para conformação de amostras de 100 mm de diâmetro (Autor)



Figura 4.7 – Molde para conformação de amostras de 96 mm de diâmetro (Autor)



Figura 4.8 – Molde para conformação de amostras de 27 mm de diâmetro (Autor)

Quanto ao dimensional das amostras, inicialmente previa-se a conformação de amostras nos diâmetros de 29 mm e 100 mm, com espessuras de 25 mm e 50 mm. Estes diâmetros foram determinados com base no dimensional dos tubos de impedância do fabricante Brüel & Kjær (B&K) e na realização dos ensaios no laboratório da Brüel & Kjær em São Paulo/ Brasil.

Entretanto, no decorrer do trabalho, surgiu a oportunidade de realizar alguns ensaios no Laboratório de Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por intermédio da Universidade de Coimbra. Para realização dos ensaios no laboratório da UFSM, foi necessário confeccionar novas amostras que atendessem ao dimensional dos tubos de impedância da UFSM. Dessa forma, foram desenvolvidos novos moldes, em PVC, para amostras com diâmetro de 27,5 mm e 96 mm.

Apesar de ser pretendido a confecção de amostras nas espessuras de 25 mm e 50 mm, serão observadas amostras com variações de espessuras, inclusive, diferente pressão de compactação, para fins de análise do comportamento de absorção sonora em diferentes espessuras e densidades.

Como se objetiva o desenvolvimento de um material com bom desempenho de absorção sonora e com características para comercialização, houve adição de solução retardante de chamas e preservante contra fungos e insetos, em algumas amostras, de forma a conferir boa durabilidade ao material. Foram confeccionadas e ensaiadas amostras sem e com aditivos, para avaliar se ocorrem variações na performance de absorção sonora em função dos aditivos.

O fluxo de processos abaixo, representado pela Figura 4.9, apresenta as etapas executadas na preparação das amostras do aglomerado do colmo do bagaço da cana-de-açúcar. Na sequência, cada etapa do fluxo será detalhada.



(*) Etapas referentes apenas a amostras que houveram aplicação de aditivos.

Figura 4.9 – Etapas de preparação das amostras do aglomerado do colmo do bagaço da cana-de-açúcar (Autor)

4.3.1 Secagem Inicial do Bagaço

Após obtenção do bagaço in natura, como mencionado no item 4.1.1, ele foi submetido a secagem ao ar livre. Essa secagem se faz necessária para eliminação da humidade residual que permanece no bagaço mesmo após o processo de moagem. Na Figura 4.10 observamos o bagaço da cana-de-açúcar no processo de secagem.



Figura 4.10 - Bagaço da cana-de-açúcar em fase de secagem ao ar livre (Autor)

4.3.2 Separação, Trituração e Peneiramento

Este trabalho visa a utilização do colmo do bagaço da cana-de-açúcar no processo de confecção de um material para condicionamento acústico, por entender que o colmo é a parte do bagaço da cana-de-açúcar com maior potencial de absorção sonora. Dessa forma, foi realizada a separação do colmo das demais partes do bagaço.

Verificou-se que as demais partes do bagaço não trariam ganho significativo para esta pesquisa, pois a rigidez da casca e a falta de porosidade poderia comprometer o desempenho de absorção sonora. Somado a isso, a alta rigidez dificulta a conformação do material, o que poderia deformar a amostra e gerar defeitos como vazios, cavidades e pontas agudas excedendo o dimensional ao longo do corpo da amostra. A Figura 4.11, demonstra apenas o colmo do bagaço da cana-de-açúcar, após separação.



Figura 4.11 – Colmo do bagaço da cana-de-açúcar separado (Autor)

Uma vez a fibra do colmo separada, iniciou-se o processo de trituração, de forma manual, com auxílio de uma lâmina. Como as fibras do colmo são bem alongadas, com variados comprimentos e espessuras, o objetivo da trituração é reduzir a fibra em fragmentos menores, cujo tamanho facilite a manipulação e formação das amostras.

A próxima etapa, foi a classificação granulométrica da fibra do colmo através do processo de peneiramento. Para esta classificação, foram utilizados dois tipos de malha, sendo uma malha de abertura maior, medindo 35 mm e a malha de abertura menor, medindo 2,79 mm. A classificação granulométrica teve como objetivo estabelecer um padrão de tamanho da fibra buscando melhorar a homogeneidade das amostras.

As Figuras 4.12 e 4.13, abaixo, apresentam, respectivamente, o colmo do bagaço da cana-de-açúcar separado e triturado e o material final a ser utilizado, já peneirado.



Figura 4.12 – Colmo do bagaço da cana-de-açúcar triturado (Autor)



Figura 4.13 – Colmo do bagaço da cana-de-açúcar peneirado em dispositivo com malha de 35 mm (Autor)

4.3.3 Lavagem e Secagem

A lavagem do material peneirado ocorreu em água corrente, expondo todo material a água e por duas vezes realizando a imersão dele. A lavagem do colmo do bagaço da cana-de-açúcar se faz necessário para retirar o residual de açúcar do material, evitando assim o surgimento de insetos, principalmente quando o material está húmido. A lavagem também proporciona a abertura dos poros do material, o que permitirá uma melhor absorção dos aditivos.

Na sequência, o material foi exposto diretamente ao sol para secagem. Um fator que dificultou a secagem das amostras foi a instabilidade do clima, pois se passaram vários dias chuvosos no período que se fazia necessário lavar e secar o material. Além disso, foi observado que esse material absorve umidade com facilidade, o que pode ocasionar a formação de mofo e escurecimento da fibra, caso o material permaneça húmido por um longo período. Na Figura 4,14 é possível observar o processo de secagem do colmo do bagaço da cana-de-açúcar após lavagem.



Figura 4.14 – Colmo do bagaço da cana-de-açúcar em seu processo de secagem pós lavagem (Autor)

4.3.4 Pesagem do Material para cada Amostra

O volume, peso e densidade para cada amostra foi determinado a partir da elaboração de um protótipo. Para este protótipo, foi utilizado aproximadamente 15 g (gramas) de fibra do colmo, 50 ml de mistura água e cola, na proporção de 70% de água e 30% de cola, e aplicada uma pressão de compactação indicada no manômetro em torno 5 kgf/cm². Com base no resultado deste protótipo, chegou-se ao volume e peso desejados para cada amostra, conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Peso esperado do colmo do bagaço aplicado em cada amostra

Diâmetro x Espessura da Amostra	Peso (g)
100 mm x 50 mm	40
96 mm x 50 mm	
100 mm x 25 mm	20
96 mm x 25 mm	
29 mm x 50 mm	8
27mm x 50 mm	
29 mm x 25 mm	6
27mm x 25 mm	

A Figura 4.15 apresenta o protótipo tomado como base para confecção das amostras.



Figura 4.15 – Protótipo base para confecção das amostras (Autor)

4.3.5 Aplicação de Preservante contra Fungos e Insetos

Para as amostras que levaram aditivos em sua composição, o preservante contra fungos e insetos foi aplicado à fibra do colmo após o material ter sido separado na proporção para formação de cada amostra. A aplicação se deu por spray, diretamente sobre o material, visando melhor distribuição da solução no material. Após aplicação, o material foi exposto ao sol para secagem. O aditivo utilizado está especificado no item 4.1.2.2. O volume de aditivo utilizado, considerando o diâmetro e a espessura da amostra, pode ser observado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Volume, em ml, de preservante aplicado em cada amostra, considerando seu diâmetro e espessura.

Diâmetro x Espessura da Amostra	Preservante (ml)
100 mm x 50 mm	10
96 mm x 50 mm	
100 mm x 25 mm	5
96 mm x 25 mm	
29 mm x 50 mm	3
27mm x 50 mm	
29 mm x 25 mm	2
27mm x 25 mm	

4.3.6 Aplicação de Cola Adesiva

Para conformação do aglomerado do colmo do bagaço da cana-de-açúcar, foi utilizado cola adesiva à base de água, conforme especificado no item 4.1.2.3. Foram adotados alguns critérios para a escolha da cola adesiva, sendo que o mais importante deles foi identificar uma cola que não interferisse ou que alterasse o mínimo possível as características originais da fibra. Para tanto, foram testados 3 tipos de colas adesivas, sendo que 2 delas foram descartadas ao verificar, visualmente, que elas formavam uma película na superfície da fibra, entendendo, assim, que essa característica poderia interferir nos resultados relacionados com a absorção acústica do material.

Após a definição da cola adesiva a ser aplicada à fibra do colmo para aglomeração, iniciou-se os testes, através do método tentativa e erro, com objetivo de determinar a proporção adequada de cola adesiva que garantisse aderência suficiente para manter as fibras do colmo aglomeradas, sem deixá-las muito rígidas e, principalmente, que não interferisse nos resultados dos ensaios de absorção sonora.

Os testes foram iniciados considerando a proporção de 20% de cola e 80% de água em um volume de 100 ml, então percebeu-se que as fibras não aglomeraram o suficiente e a amostra se desmanchou facilmente após a secagem. O próximo teste ocorreu com 35% de cola, nessa condição houve uma melhoria em relação à aglomeração, porém, não suficiente e a amostra continuou fragmentando com facilidade. O teste seguinte considerou 50% de cola e 50% de água, obtendo um melhor resultado em relação à aglomeração das fibras, porém, com essa proporção em um volume de 100 ml, a mistura se mostrou densa, o que dificultou o processo de aplicação por aspersão, reduzindo o leque.

Mesmo obtendo um bom resultado com a proporção de 50% de cola e 50% de água, foi realizada mais uma tentativa utilizando 70% de cola em 100 ml de mistura, o que aumentou significativamente a aderência do aglomerado da fibra, entretanto, a amostra se mostrou muito rígida, inclusive mudando o aspecto do material. Dado todos esses testes, optou-se por seguir com a proporção de 50% de cola e 50% de água, realizando um aperfeiçoamento para melhorar a aplicabilidade da cola por meio de aspersão. A água foi aquecida a uma temperatura de 70°C, essa condição melhorou a diluição e facilitou a aplicação por aspersão, além do resultado satisfatório em termos de aglomeração das fibras.

A aplicação da mistura de cola e água ocorreu, individualmente, diretamente no material já separado, na proporção para formação de cada amostra. A Tabela 4.3, apresenta o volume, em ml, da mistura de cola e água aplicada no material, considerando seu diâmetro e espessura.

Tabela 4.3 – Volume, em ml, da mistura de cola e água aplicada em cada amostra considerando seu diâmetro e espessura

Diâmetro x Espessura da Amostra	Mistura de Cola e Água (ml)
100 mm x 50 mm	80
96 mm x 50 mm	
100 mm x 25 mm	40
96 mm x 25 mm	
29 mm x 50 mm	20
27mm x 50 mm	
29 mm x 25 mm	10
27mm x 25 mm	

4.3.7 Deposição do Material no Molde para Conformação e Prensagem Controlada

Após aplicação da mistura de cola e água ao colmo do bagaço da cana-de-açúcar, o material foi depositado manualmente no molde, em pequenas quantidades por vez, buscando uma distribuição uniforme dentro do molde. Em seguida, foi colocada a tampa superior do molde e levado à prensa hidráulica para realização da compactação. É importante que a etapa de prensagem ocorra imediatamente após a deposição do material com cola no molde, para evitar a secagem da cola antes da conformação da amostra.

A prensagem controlada foi dividida em dois estágios. No primeiro estágio, a amostra foi submetida a uma pressão de aproximadamente 14 kgf/cm^2 , indicada no manômetro, para acomodação do material no interior do molde e melhor distribuição da cola adesiva entre as fibras, em seguida a pressão foi aliviada a zero (0). No segundo estágio, a amostra foi submetida a pressão de compactação final, conforme registrado na Tabela 4.5, apresentada no item 4.3.9. Sendo que, neste estágio, a amostra permaneceu sob pressão por aproximadamente 2 minutos, em seguida a tampa superior do molde foi travada para que o material se mantivesse sob pressão e não sofresse expansão além da espessura desejada.

A Figura 4.16 apresenta o projeto 2D da prensa hidráulica, informações detalhadas da prensa estão disponíveis no item 4.1.3.1. Já as Figuras 4.17 e 4.18 apresentam a prensagem de uma amostra de 100 mm e de uma amostra de 29 mm, respectivamente.

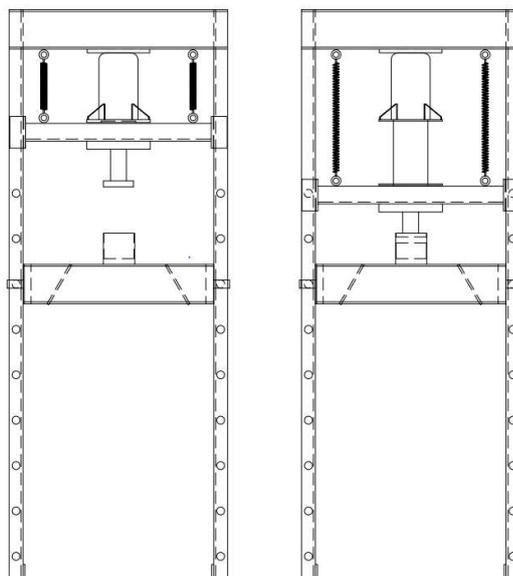


Figura 4.16 - Projeto 2D da prensa hidráulica com vista em corte frontal (Autor)



Figura 4.17 – Prensagem de amostra de 100 mm (Autor)



Figura 4.18 – Prensagem de amostra de 29 mm (Autor)

Além da pressão de compactação, registrada no manômetro, foram calculadas as tensões submetidas diretamente em cada amostra, em função de sua área conforme expressão matemática (5),

$$F = P_m * \pi * \left(\frac{44}{4}\right)^2 \quad (5)$$

onde P_m representa o valor da pressão registrada no manômetro.

Uma vez obtida a carga que o hidráulico está exercendo (F), na unidade de medida kgf, calcula-se a tensão na amostra considerando seu diâmetro, conforme expressão matemática (6).

$$P = \frac{F}{\left(\pi * \left(\frac{d}{10}\right)/2\right)^2} \quad (6)$$

onde P representa a pressão submetida à amostra e d representa o diâmetro, em milímetros, da amostra. A unidade de medida passa a ser kgf/cm².

4.3.8 Secagem e Aplicação de Retardante de Chamas

Com as amostras ainda dentro dos moldes, elas foram expostas ao sol. Passaram aproximadamente 12 horas, em secagem, dentro do molde. Após esse período, as amostras foram retiradas do molde e expostas ao sol por, aproximadamente, 96 horas. Por vezes, a secagem das amostras foi um desafio dado alguns períodos chuvosos. Algumas amostras foram perdidas pois não houve viabilidade de plena secagem.

Uma vez as amostras secas, para as amostras que receberam aditivos em sua composição, foi aplicado retardante de chamas, conforme especificado no item 4.1.2.1. O volume de aditivo utilizada pode ser vista na Tabela 4.4. Após a aplicação do aditivo, as amostras foram expostas, novamente, ao sol, para secagem.

Tabela 4.4 - Proporção de aplicação do aditivo retardante de chamas, em cada amostra, considerando seu diâmetro e espessura.

Diâmetro x Espessura da Amostra	Retardante de Chamas (ml)
100 mm x 50 mm	40
96 mm x 50 mm	
100 mm x 25 mm	30
96 mm x 25 mm	
29 mm x 50 mm	10
27mm x 50 mm	
29 mm x 25 mm	5
27mm x 25 mm	

4.3.9 Aferição Final de Dimensional e Peso e Identificação das Amostras

Foi observado que, durante o processo de secagem final das amostras, elas sofreram pequenas alterações em suas dimensões, principalmente em relação a espessura. Além disso, durante a retirada das amostras dos moldes e com a manipulação delas nas etapas seguintes, ocorreu uma perda de material. Essa perda de material equivale, aproximadamente, a 1 grama. Na Figura 4.19 é possível ver material que se desprende das amostras durante a retirada das tampas e fundos dos moldes.



Figura 4.19 – Perda de material das amostras (Autor)

Outro fator a considerar é a adição da cola adesiva e aditivos, que altera o peso inicial pretendido. Diante desses cenários, as amostras foram aferidas em termos de dimensional e peso, após conformadas e secas. Na Tabela 4.5 estão registrados a identificação das amostras, a instituição para qual foram enviadas para realização dos ensaios de absorção sonora, o dimensional, o peso final, a pressão de compactação no manômetro e se passaram pela adição de aditivos (retardante de chamas e preservante).

Tabela 4.5 - Identificação das amostras com informações detalhadas

Instituição	Identificação da Amostra	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Peso (g)	Massa Volúmica (kg/m ³) (*)	Pressão (kgf/cm ²)	Possui Aditivo?
UFMS	Amostra 01	95,08	57,30	47,00	115,5	10	Não
UFMS	Amostra 02	95,30	58,05	48,10	116,2	10	Sim
UFMS	Amostra 03	94,59	27,28	20,40	106,4	10	Não
UFMS	Amostra 04	93,83	26,50	22,10	120,6	10	Não
UFMS	Amostra 05	95,50	37,75	27,70	102,4	10	Sim
UFMS	Amostra 06	27,87	58,10	8,00	225,7	12	Não
UFMS	Amostra 07	27,72	58,00	8,10	231,4	12	Sim
UFMS	Amostra 08	27,78	32,20	5,50	281,8	12	Não
UFMS	Amostra 09	27,75	32,64	5,70	288,7	12	Sim
UFMS	Amostra 10	99,33	51,40	37,70	94,7	10	Não
UFMS	Amostra 11	99,50	33,39	39,30	151,4	20	Sim
UFMS	Amostra 12	29,38	55,01	6,40	171,6	10	Não
B&K	Amostra 13	99,98	52,67	42,00	101,6	10	Não
B&K	Amostra 14	99,19	58,94	39,40	86,5	10	Sim
B&K	Amostra 15	99,31	32,55	39,60	157,1	20	Não
B&K	Amostra 16	100,50	48,44	43,70	113,7	10	Sim
B&K	Amostra 17	98,48	24,70	22,90	121,7	10	Não
B&K	Amostra 18	99,04	23,90	23,50	127,6	10	Sim
B&K	Amostra 19	29,56	53,40	8,20	223,8	10	Não
B&K	Amostra 20	30,14	52,90	6,40	169,6	12	Sim
B&K	Amostra 21	29,84	28,99	5,30	261,4	10	Não
B&K	Amostra 22	29,95	33,13	7,10	304,2	20	Sim

(*) Os valores apresentados nessa coluna, são valores aproximados em função do método de cálculo utilizado.

4.4 Instrumentação e Norma ISO 10534-2

O tubo de impedância é um equipamento laboratorial que possibilita obter o coeficiente de absorção sonora de materiais com incidência normal. As vantagens da utilização desse método dizem respeito a:

- Medição através de pequenas amostras de materiais;
- Teste rápido;
- Boa correlação com modelos.

Como desvantagens do uso desse método, podemos referir:

- Necessário garantir que a amostra seja plana;
- Suscetível à condição de contorno da amostra;
- Não representa o campo acústico real.

De forma geral, o tubo de impedância consiste em um tubo com paredes suficientemente rígidas e que apresenta em uma de suas extremidades internas um alto falante e, na outra, a amostra a ser analisada. A medição é realizada através de dois microfones posicionados criteriosamente na superfície do tubo. Os dois microfones captam as variações de pressão que são enviadas para o equipamento de aquisição de sinal (Pulse). No computador, o software executa as etapas de processamento e análise do sinal, calculando o coeficiente de absorção sonora. A Figura 4.20 ilustra esquematicamente a geometria do tubo de impedância.

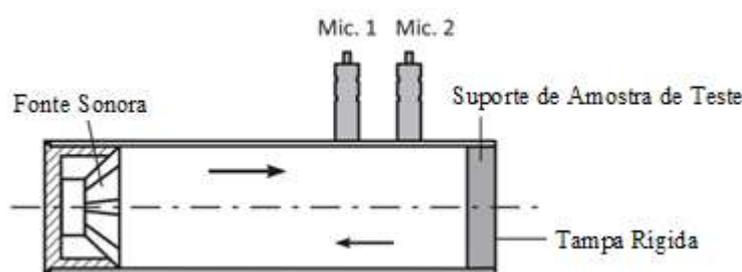


Figura 4.20 - Geometria do tubo de impedância (adaptado de Brüel & Kjær@)

O método da função de transferência em tubo de impedância é descrito pela norma ISO 10534-2:2001 “Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes - Part 2: Transfer-function method”. Esse método considera a formação de

ondas planas internamente em um tubo e, conseqüentemente, incidência sonora normal à superfície do material a ser testado. O tubo de impedância apresenta um diâmetro interno (d) que limita a frequência máxima a ser analisada, chamada frequência de corte do tubo. Essa frequência, segundo a norma ISO 10534-2, é definida pela equação (7):

$$fc = \frac{1,84c_0}{\pi d} \quad (7)$$

onde, fc é a frequência de corte do tubo, c_0 a velocidade do som dentro do tubo e d o diâmetro interno do tubo.

A função de transferência utilizada na medição é dada pela equação (8):

$$H_{12} = \frac{P_2(f)}{P_1(f)}, \quad (8)$$

sendo $P_1(f)$ e $P_2(f)$ as pressões sonoras captadas pelos microfones 1 e 2, respectivamente, no domínio da frequência.

Existe uma recomendação, segundo a norma ISO 10534-2, para um tipo de calibração da função de transferência $H(f)$ que deve ser feita a partir do intercambiamento entre as posições dos microfones, isto é, faz-se uma medição com os microfones em suas devidas posições e mede-se a função de transferência. Logo após, trocam-se as posições dos microfones no tubo e realiza-se uma nova medição obtendo-se $H^*(f)$. Então, a função transferência do microfone 2 para 1, $H_{12}(f)$, é dada pela equação (9):

$$H_{12} = [H(f) \cdot H^*(f)]^{0,5} \quad (9)$$

Com o valor da função de transferência é possível calcular o coeficiente de reflexão do material, segundo a norma ISO 10534-2, de acordo com a equação (10):

$$r = \frac{H_{12} - e^{-ik_0s}}{e^{ik_0s} - H_{12}} e^{2k_0s} \quad (10)$$

onde k_0 é o número de onda e s é a distância entre os microfones.

Com o valor de r , é calculado o coeficiente de absorção para incidência normal à superfície do material, dado pela equação (11):

$$\alpha(\theta) = 1 - |r|^2 \quad (11)$$

Quanto aos instrumentos utilizados para medição da absorção sonora das amostras, seu detalhamento está a seguir.

Kit de tubo de impedância modelo 4206 da marca Brüel & Kjær (B&K), composto por tubo com diâmetro interno de 100 mm, cuja faixa de frequência útil é de 100 Hz – 1,6 kHz e tubo com diâmetro interno de 29 mm, cuja faixa de frequência útil é de 500 Hz - 6,4 kHz. As Figuras 4.21 e 4.22 representam os equipamentos.



Figura 4.21 - Tubo de impedância de 100 mm modelo 4206 da marca Brüel & Kjær (Brüel & Kjær@)



Figura 4.22 - Tubo de impedância de 29 mm modelo 4206 da marca Brüel & Kjær (Brüel & Kjær@)

Equipamentos que compõem o kit utilizado nos ensaios realizados na B&K:

- Multianalisador Pulse B&K, modelo 3560-C
- Software Pulse Material Testing Program Type 7758 da marca B&K
- Microfones de ¼" modelo B&K 4187
- Pré-amplificador ¼" modelo B&K 2670
- Calibrador acústico modelo B&K 4231

Tubo de impedância de 97 mm de diâmetro interno, do laboratório de acústica da Universidade Federal de Santa Maria, construído em aço 1020, representado na Figura 4.23. A parede de fundo do porta amostra é de 20 mm, para garantir máxima reflexão sonora. O espaçamento entre os microfones é de 80 mm e a distância entre o microfone de referência e a entrada do tubo é de 399 mm. A faixa de frequência útil desse equipamento é de 80 Hz até 2000 Hz.

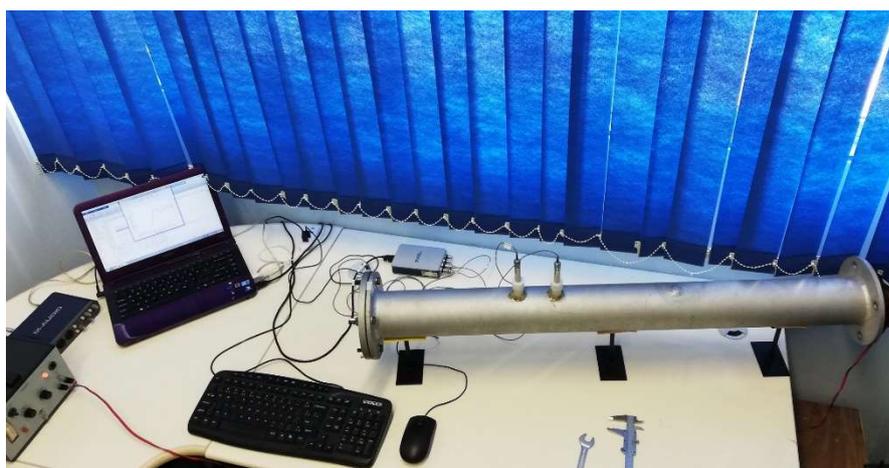


Figura 4.23 – Kit do tubo de impedância de 97 mm do laboratório de acústica da UFSM (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM)

Tubo de impedância de 27,7 mm de diâmetro interno, do laboratório de acústica da Universidade Federal de Santa Maria, construído em aço 1020, representado pelas Figuras 4.24 e 4.25. A parede de fundo do porta amostra é de 20 mm, para garantir máxima reflexão sonora. Este equipamento permite o posicionamento dos microfones em duas posições com espaçamento de 23,5 mm e 100 mm, sendo que a distância entre o microfone de referência e a entrada do tubo é de 64 mm. A faixa de frequência útil desse equipamento é de 100 Hz até 6000 Hz.



Figura 4.24 - Tubo de impedância de 27,7 mm do laboratório de acústica da UFSM (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM)



Figura 4.25 – Kit do tubo de impedância de 27,7 mm do laboratório de acústica da UFSM (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM)

Equipamentos que compõem o kit utilizado nos ensaios realizados laboratório de acústica da UFSM:

- Amplificador B&K 5215
- Microfones de ½” modelo B&K 4942
- Calibrador de microfones B&K 4231 (94 dB - 1 kHz)
- Placa National Instruments modelo NI 9234, de 4 canais de entrada
- Placa MAudio modelo Fast Track Pro, usando ruído branco

- Paquímetro analógico
- Termo-higrômetro marca Prolab, para registro de humidade e temperatura
- Computador com software Matlab para aquisição dos sinais.

4.5 Procedimentos de Medição do Coeficiente de Absorção Sonora

A etapa laboratorial, para realização dos ensaios de absorção sonora, foi prejudicada devido ao cenário da pandemia COVID-19. Era esperado a realização e o acompanhamento dos ensaios *in loco* no laboratório da Universidade de Coimbra. Porém, com as restrições impostas em relação a viagens, a ida a Coimbra/ Portugal não foi possível. Dessa forma, os ensaios foram realizados no Brasil, ainda com limitação de acesso aos laboratórios, e contando com o apoio incondicional de colegas e professores. Pela B&K, os ensaios foram realizados pelo MSc Fernando Diaz, Application Engineering, E, pela UFSM, os ensaios foram realizados pelo Professor Doutor Paulo Henrique Mareze.

Todos os ensaios seguiram os procedimentos e orientações fornecidos pelos professores orientadores, desta pesquisa e baseados na Norma ISO 10534-2.

Para as medições realizadas no laboratório da B&K, foram realizadas de 3 a 6 medições para cada amostra. Em cada medição, a amostra foi retirada do porta amostra e montada novamente. Inicialmente, as amostras pequenas (diâmetro = 29 mm) não entravam no tubo, neste caso, foi necessário utilizar uma lixa para ajuste das dimensões das amostras, o que resultou em uma superfície mais lisa. A exemplo da Amostra 19, conforme pode ser observado na Figura 4.26.



Figura 4.26 - Amostra 19 lixada (MSc Fernando Diaz)

Devido a irregularidade das superfícies das amostras, o que pode interferir nos resultados das medições, alguns ajustes foram aplicados em algumas amostras, tais como:

- Lixar o corpo da amostra;
- Cobrir o fundo da amostra com plástico filme;
- Cobrir o fundo da amostra com massa de modelar;
- Usar gel de ultrassom no fundo do porta amostra.

As Figuras 4.27 a 4.29 evidenciam os ajustes. O objetivo desses ajustes foi cobrir pequenos espaços que podem gerar cavidades entre a amostra e a parede do porta amostra, podendo criar efeito ressonador.



Figura 4.27 - Amostra 18 com fundo lizado e plástico filme envolvendo-a (MSc Fernando Diaz)



Figura 4.28 - Amostra 18 com fundo lizado e massa de modelar (MSc Fernando Diaz)

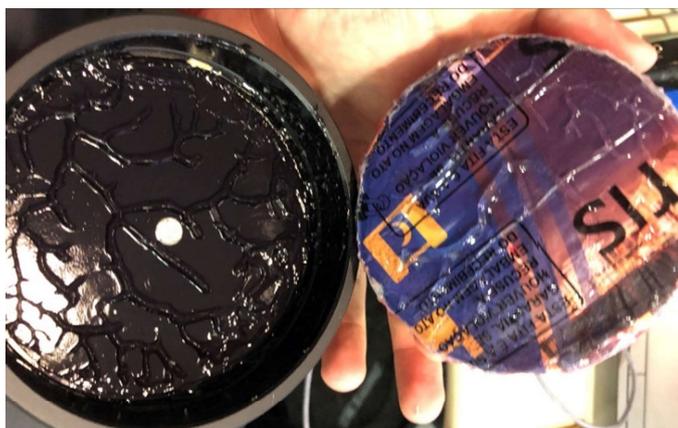


Figura 4.29 - Amostra 18 com fundo lixado, massa de modelar e gel de ultrassom (MSc Fernando Diaz)

Os dados exibidos na Figura 4.30, são resultados, em escala linear, das medições realizadas na Amostra 18, considerando a amostra sem qualquer ajuste, a amostra com fundo lixado e envolvida no plástico filme e a amostra com fundo lixado e massa de modelar.

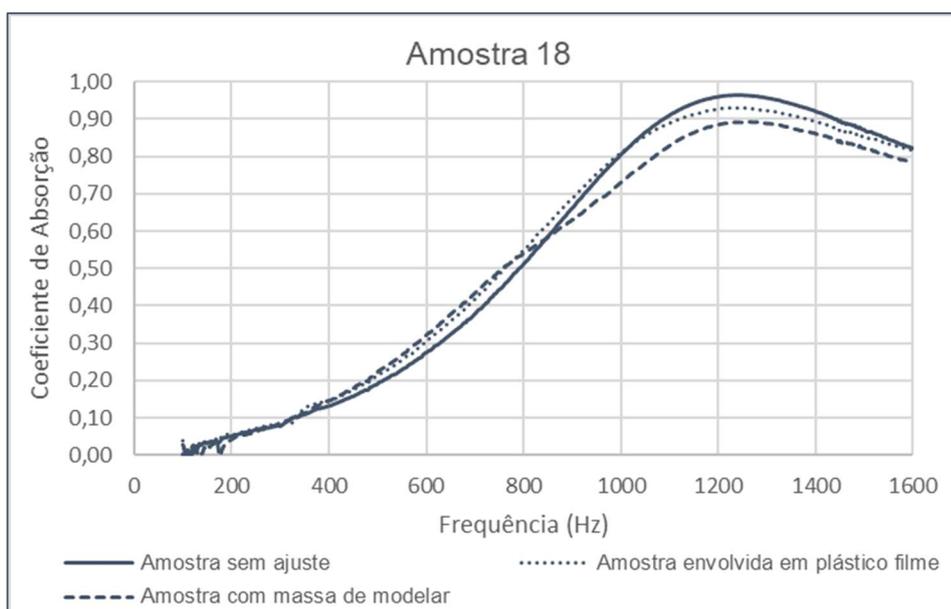


Figura 4.30 – Coeficiente de absorção sonora, em escala linear de frequência, da Amostra 18

Quanto às medições realizadas no laboratório de acústica da Universidade Federal de Santa Maria, as irregularidades nas amostras também foram percebidas, sendo necessário, em alguns casos, realizar ajustes tais como, lixar o corpo da amostra, envolver a lateral da amostra em fita,

elástico ou EVA (Etileno Acetato de Vinila), conforme pode ser visto nas Figuras 4.31 a 4.34. O objetivo desses ajustes foi melhorar a estanqueidade entre a amostra e a parede do tubo.



Figura 4.31 – Amostra 5 com lateral envolvida por fita (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM)



Figura 4.32 – Amostra 5 com lateral envolvida por elástico (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM)



Figura 4.33 – Amostra 2 com lateral envolvida por EVA (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM)



Figura 4.34 – Amostra 2 com lateral envolvida por EVA posicionada no tubo de impedância (Prof. Paulo H. Mareze, EAC-UFSM)

Os dados exibidos no gráfico representado pela Figura 4.35 apresentam o coeficiente de absorção sonora, em escala linear, da Amostra 05, onde uma medição ocorreu com a lateral envolvida por fita, e outra medição com a lateral envolvida com elástico.

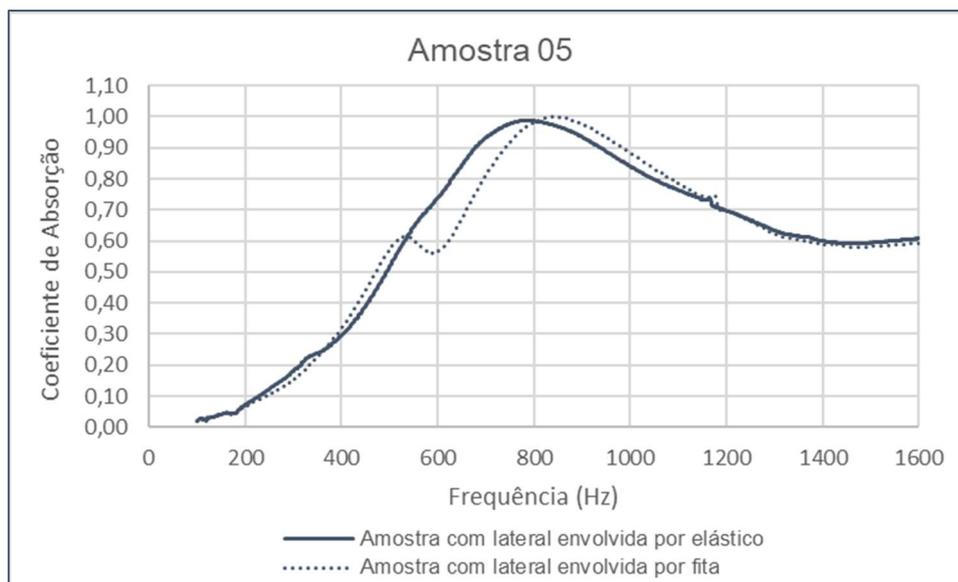


Figura 4.35 – Coeficiente de absorção sonora, em escala linear de frequência, da Amostra 05

Conforme observado no gráfico da Amostra 05, ocorreram pequenas ondulações, principalmente entre as faixas de frequências de 500 a 800 Hz, essas ondulações ficam mais evidentes nos gráficos em escala linear de frequência. Este comportamento, pode estar associado as características próprias deste tipo de material.

No laboratório de acústica da UFSM, cada amostra foi ensaiada 2 vezes. Uma vez na posição normal, ou seja, com a face mais porosa da amostra voltada para a fonte. E uma segunda vez na posição invertida, ou seja, a face mais lisa voltada para a fonte.

Ao final, os dados das medições foram exportados para uma planilha MS Excel, onde foi calculada a média do coeficiente de absorção sonora de cada amostra, e gerados os gráficos com as curvas de absorção sonora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao todo, foram ensaiadas 15 amostras das 22 confeccionadas, sendo 8 amostras de diâmetro maior e 7 amostras de diâmetro menor. Desse total, o resultado de 1 amostra foi desconsiderado em função de inconsistência apresentada na curva de absorção sonora, quando comparado com os resultados das demais amostras.

As amostras ensaiadas, e os coeficientes de absorção obtidos, estão apresentados na Tabela 5.1. Mesmo utilizado metodologia única para confecção de todas as amostras, ao final, ficou evidente algumas características físicas construtivas distintas entre elas. A razão para isso pode estar relacionada ao comportamento do próprio material, além do processo de conformação das amostras e as variáveis durante o processo de secagem.

Tabela 5.1 – Amostras ensaiadas e o seu coeficiente de absorção.

Identificação da Amostra	Coeficiente de Absorção Sonora					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Amostra 01 (*)	0,09	0,43	0,71	0,76	0,72	-
Amostra 02 (*)	0,08	0,40	0,77	0,69	0,76	-
Amostra 04 (*)	0,02	0,09	0,46	0,91	0,53	-
Amostra 05 (*)	0,03	0,13	0,56	0,84	0,59	-
Amostra 06	0,25	0,34	0,37	0,41	0,42	0,47
Amostra 07	0,23	0,31	0,37	0,42	0,43	0,46
Amostra 08	0,12	0,22	0,27	0,34	0,48	0,59
Amostra 09	0,12	0,19	0,23	0,29	0,40	0,49
Amostra 11 (*)	0,05	0,22	0,56	0,59	0,54	-
Amostra 13 (*)	0,06	0,25	0,88	0,65	0,72	-
Amostra 15 (*)	0,03	0,15	0,62	0,67	0,61	-
Amostra 18 (*)	0,02	0,07	0,21	0,77	0,80	-
Amostra 19 (**)	0,14	0,25	0,37	0,50	0,53	0,62
Amostra 21 (**)	0,07	0,14	0,22	0,31	0,38	0,51

(*) Para os resultados, dessas amostras, onde se lê 2000 Hz na identificação da coluna, considerar 1600 Hz. Pois para amostras de maior diâmetro, essa é a última banda completa analisada.

(**) Essa amostras foram ensaiadas em um tubo de impedância com o range de frequência de 500 Hz a 6.4 kHz, dessa forma, os valores apresentados abaixo da frequência de 500 Hz podem apresentar inconsistência.

5.1 Detalhamento dos Resultados do Coeficiente de Absorção Sonora

5.1.1 Tubo de Impedância com diâmetro de 97 mm. Amostras 01 e 02.

A Figura 5.1 exibe o gráfico com a curva de absorção sonora, resultante dos ensaios das Amostras 01 e 02. Trata-se de amostras com características físicas construtivas semelhantes, onde elas apresentam espessuras entre 57 e 58 mm, peso entre 47 g e 48 g e pressão de compactação de 10 kgf/cm² no manômetro, equivalente a uma pressão de 2,1 kgf/cm² diretamente na amostra.

Através do gráfico é possível observar uma curva com elevação predominante, alcançando as maiores amplitudes a partir da frequência de 500 Hz, com uma tendência estável até atingir a frequência de 1600 Hz. O índice máximo de absorção registrado ficou na ordem de 76% ($\alpha = 0,76$) por volta da frequência de 1000 Hz para a Amostra 01, enquanto a Amostra 02 obteve o índice de absorção de 77% ($\alpha = 0,77$) na frequência de 500 Hz.

Outro ponto a observar, é que, para Amostra 01 houve aplicação de aditivo retardante de chamas e preservante contra fungos e insetos, enquanto a Amostra 02 não possui aplicação de aditivos. Porém, o resultado do índice de absorção sonora de ambas as amostras não apresenta diferença significativa, o que nos leva a concluir que aplicação de tais aditivos não comprometeu o desempenho de absorção sonora para esse tipo de material.

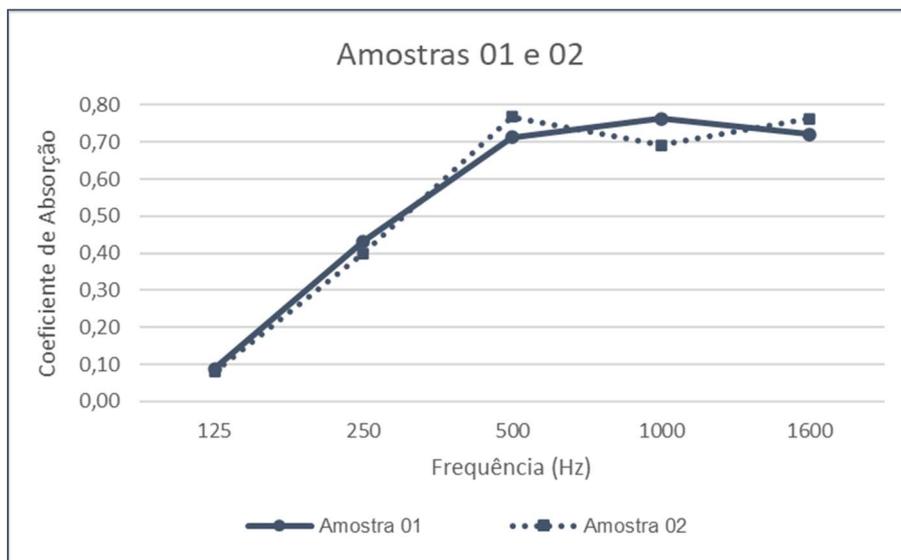


Figura 5.1 – Coeficiente de absorção sonora das Amostras 01 e 02

5.1.2 Tubo de Impedância com diâmetro de 97 mm. Amostras 04 e 05.

O gráfico, representado pela Figura 5.2, apresenta a curva do coeficiente de absorção sonora da Amostra 04. Com espessura de 26 mm e peso de 22 g, esta amostra obteve uma amplitude máxima de 91% ($\alpha = 0,91$), tendo a sua melhor resposta na frequência de 1000 Hz, em seguida ocorre uma tendência de decaimento até chegar na frequência de 1600 Hz com um índice de absorção de 53% ($\alpha = 0,53$).

Este decaimento pode estar relacionado com pequenas irregularidades no corpo da amostra, gerando cavidades e comprometendo a estanqueidade entre as laterais da amostra com relação ao tubo de impedância. Outro fator que pode ter contribuído para este decaimento, seria a falta de contato perfeito entre o fundo da amostra com o porta amostras, gerando efeitos de ressonador.

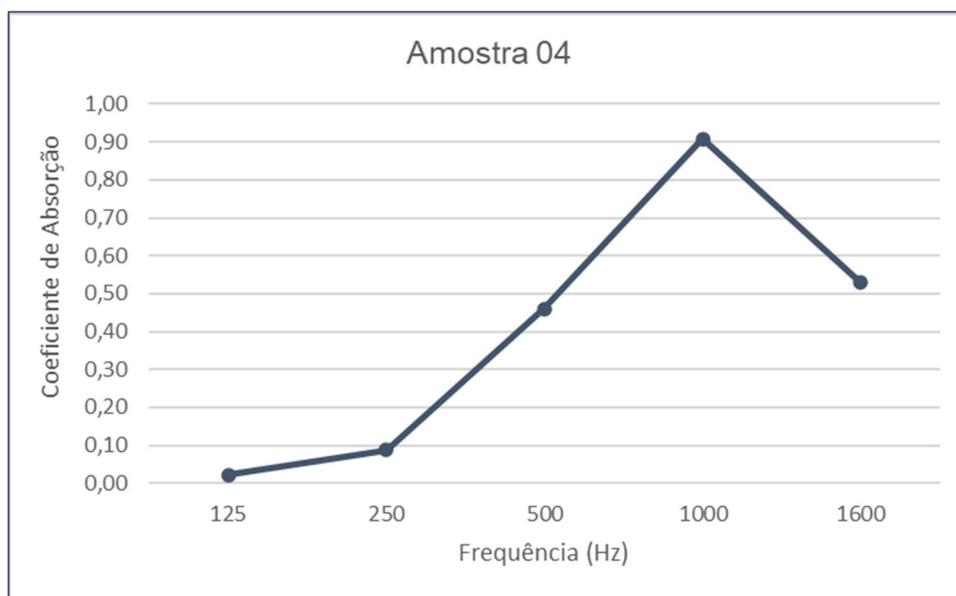


Figura 5.2 – Coeficiente de absorção sonora da Amostra 04

Comportamento similar ao da Amostra 04 é observado na Amostra 05. A diferença entre elas está na espessura e peso, enquanto a Amostra 05 tem espessura em torno de 37 mm e peso de 27,7 g, a Amostra 04 possui espessura de 26 mm e peso de 22 g. A Amostra 05 também atinge sua amplitude máxima por volta da frequência de 1000 Hz, alcançando um índice de absorção de 84% ($\alpha = 0,84$), conforme pode ser observado na Figura 5.3. Porém, sua curva não manteve uma tendência estável após a frequência de 1000 Hz, ocorrendo um decaimento moderado até atingir a frequência de 1600 Hz, com um índice de absorção de 59% ($\alpha = 0,59$).

Conforme já foi mencionado na análise da Amostra 04, este decaimento pode estar relacionado a pequenas irregularidades no corpo da amostra.

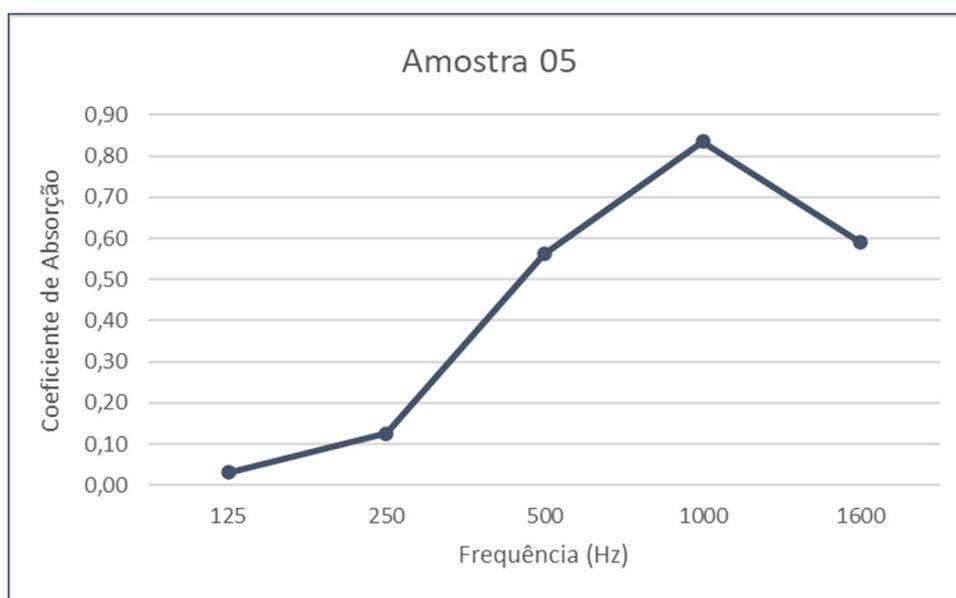


Figura 5.3 – Coeficiente de absorção sonora da Amostra 05

5.1.3 Tubo de Impedância com diâmetro de 97 mm e 100 mm. Amostras 11 e 15, respectivamente.

Os dados apresentados na Figura 5.4, se referem aos resultados dos ensaios das Amostras 11 e 15. Essas amostras possuem características físicas construtivas semelhantes, sendo elas: espessura entre 32 e 33 mm, peso em torno de 39 g e pressão de compactação de 20 kgf/cm² no manômetro, equivalente a uma pressão de 4,2 kgf/cm² diretamente na amostra. Esses resultados demonstram comportamento similar às demais amostras deste grupo, ou seja, o gráfico apresenta curvas com desempenho estável entre as faixas de frequência de 500 Hz e 1600 Hz, sendo que os maiores índices de absorção sonora foram de $\alpha = 0,59$ para Amostra 11, de $\alpha = 0,72$ para Amostra 15, sem o fundo lixado e de $\alpha = 0,67$ com o fundo lixado.

Este ajuste na Amostra 15 se fez necessário dada a existência de irregularidade na superfície dela, o que poderia interferir no resultado.

Outra característica que diferencia as amostras é que, para a Amostra 11, houve aplicação de aditivo retardante de chamas e preservante contra fungos e insetos, enquanto a Amostra 15 não possui aplicação de aditivos. Mesmo a Amostra 11 apresentando desempenho de absorção sonora um pouco mais baixo, não é seguro afirmar que esta diferença esteja relacionada à adição dos aditivos, podendo existir outros fatores, tais como: irregularidades no dimensional do corpo da amostra, variabilidade construtiva e a diferença de homogeneidade entre as amostras.

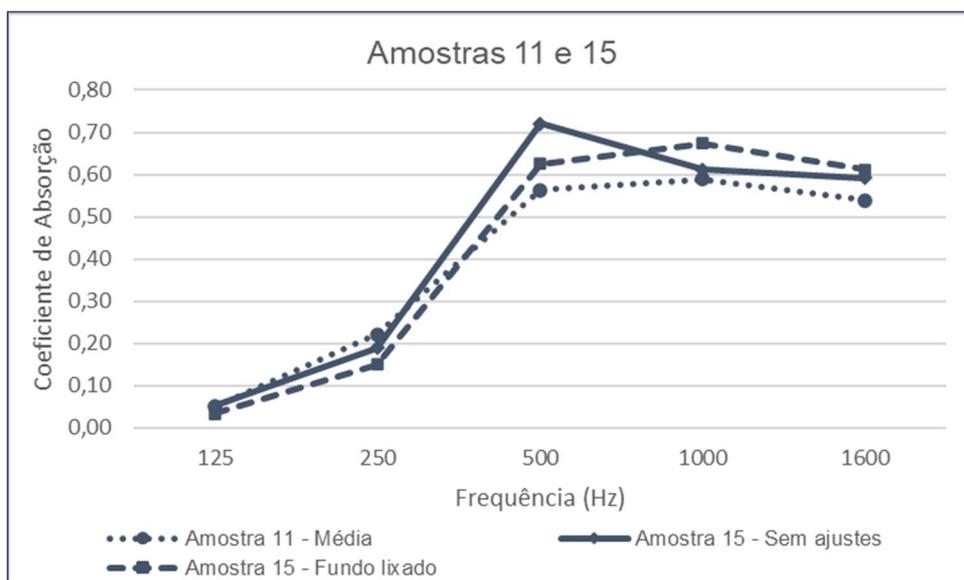


Figura 5.4 – Coeficiente de absorção sonora das Amostras 11 e 15

5.1.4 Tubo de Impedância com diâmetro de 100 mm. Amostra 13.

Através do resultado a seguir apresentado, pela Figura 5.5, referente à Amostra 13, é possível ratificar o bom desempenho do aglomerado do colmo do bagaço da cana-de-açúcar para médias frequências, onde a curva de absorção sonora manteve a sua tendência estável entre as frequências de 500 Hz e 1600 Hz. Para a Amostra 13, o índice máximo de absorção foi de 80% ($\alpha = 0,80$).

A Amostra 13 teve a sua superfície do fundo ajustada com lixa para correção de pequenas irregularidades e melhorar o contato com o porta amostras.

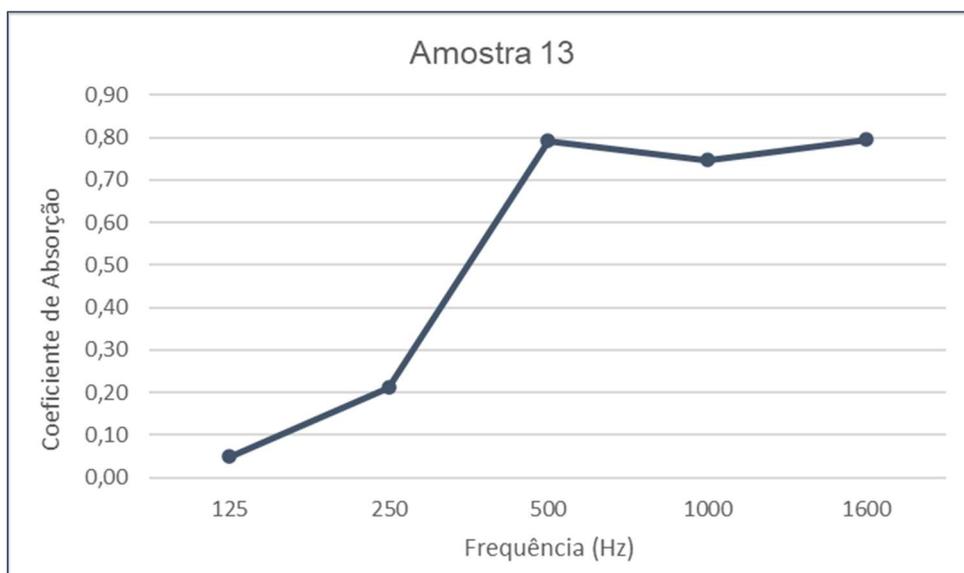


Figura 5.5 – Coeficiente de absorção sonora da Amostra 13

5.1.5 Tubo de Impedância com diâmetro de 27,7 mm. Amostras 06 e 07.

O gráfico seguinte, em bandas de oitava, representado pela Figura 5.6, mostra as curvas de absorção sonora com os resultados dos ensaios para as Amostras 06 e 07. Em função da similaridade física construtiva entre as duas amostras, foi realizada a sobreposição das curvas para efeito de comparação e análise. Apesar da similaridade física entre as amostras, elas possuem características químicas diferentes, pois a Amostra 07 recebeu a aplicação de aditivo retardante de chamas e preservante contra fungos e insetos. Mesmo a Amostra 07 contendo aditivos, não houve diferenças significativas entre os resultados. O que demonstra, mais uma vez, que a adição dos aditivos não tem influenciado significativamente no desempenho de absorção sonora do material.

O gráfico mostra as curvas com tendência ascendente entre as faixas de frequência de 125 Hz a 4000 Hz, com o coeficiente de absorção máximo atingindo uma amplitude de $\alpha = 0,47$.

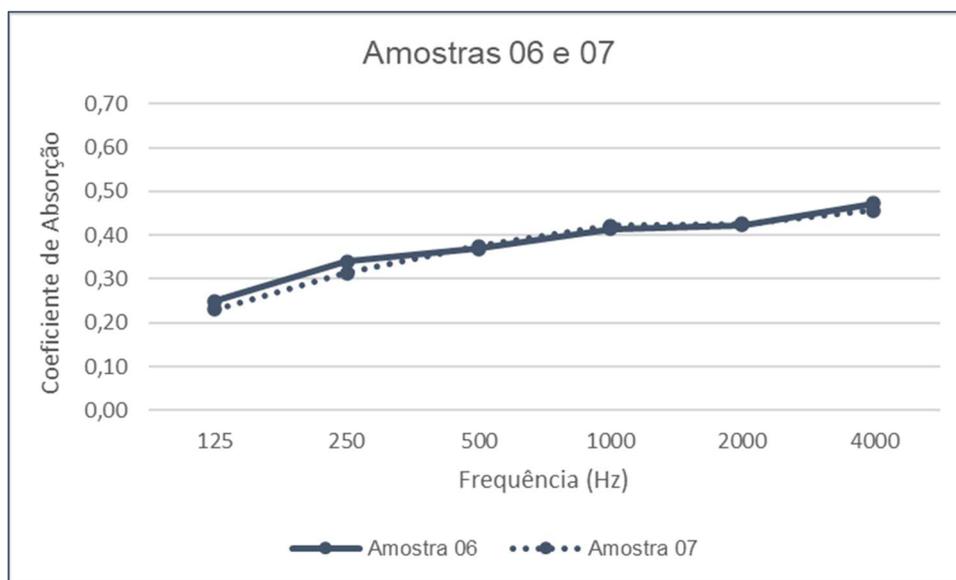


Figura 5.6 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, das Amostras 06 e 07

5.1.6 Tubo de Impedância com diâmetro de 27,7 mm. Amostras 08 e 09.

As Amostras 08 e 09 apresentaram uma tendência semelhante aos resultados das Amostras 06 e 07, mesmo tendo espessuras menores, conforme dados construtivos mostrados na Tabela 4.5. O índice de absorção sonora, em sua amplitude máxima, atingiu $\alpha = 0,59$, em torno da frequência de 4000 Hz, para curva da Amostra 08, enquanto a Amostra 09 teve um índice máximo de $\alpha = 0,49$. Foi observado, também, que ambas as curvas tiveram uma elevação mais acentuada após a frequência de 1000 Hz, resultados esses que estão apresentados na Figura 5.7.

Da mesma forma que as Amostras 06 e 07 possuem características químicas diferentes, as Amostras 08 e 09 também trazem essa diferença em sua composição, onde a Amostra 09 recebeu a aplicação de aditivo retardante de chamas e preservante contra fungos e insetos. Mesmo com essa variável na composição da Amostra 09, e tendo ocorrido um leve distanciamento entre as curvas, não é seguro afirmar que a variação tenha ocorrido em função da presença dos aditivos nas fibras.

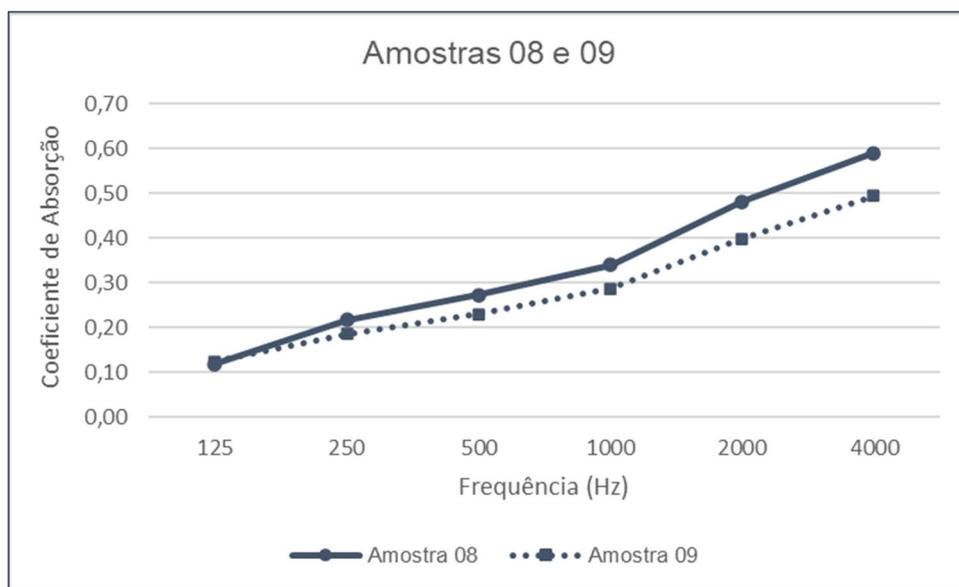


Figura 5.7 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, das Amostras 08 e 09

5.1.7 Tubo de Impedância com diâmetro de 29 mm. Amostras 19 e 21.

A Figura 5.8 apresenta o resultado da Amostra 19. Este resultado apresentou um melhor desempenho de absorção sonora quando comparado aos resultados das Amostras 06 e 07, que possuem características físicas construtivas bem próximas.

Essas variações nos resultados entre amostras com características similares, pode estar relacionado ao nível de intervenção que cada amostra sofreu para corrigir pequenas irregularidades em sua superfície, dificultando um encaixe adequado ao tubo de impedância, além de possível variabilidade na homogeneidade entre as amostras.

A curva ascendente, no domínio da frequência, principalmente a partir da frequência de 500 Hz, demonstra claramente o bom desempenho do aglomerado do colmo do bagaço da cana-de-açúcar para altas frequências. O índice de absorção teve sua amplitude máxima em $\alpha = 0,62$ por volta da frequência de 4000 Hz.

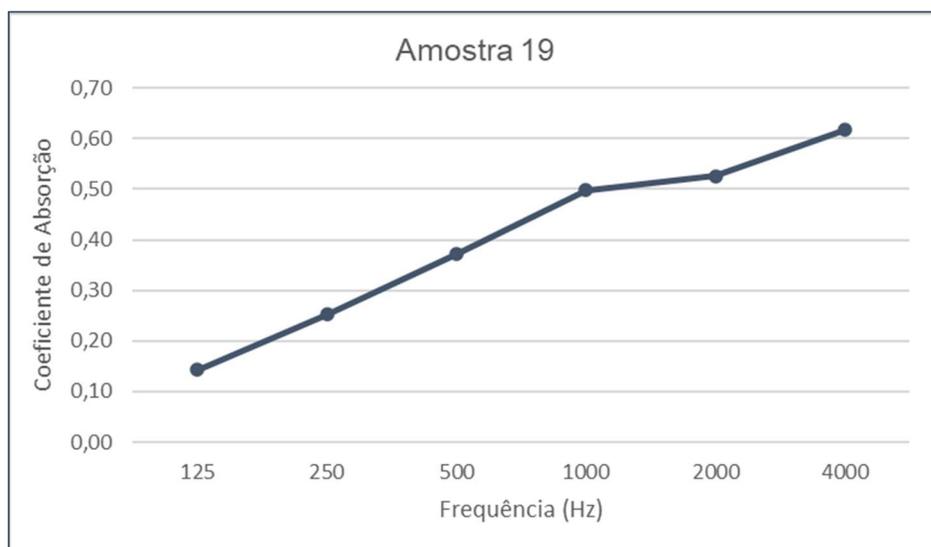


Figura 5.8 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, da Amostra 19

O próximo resultado é referente à Amostra 21, mostrado através da Figura 5.9. Não foi muito diferente dos resultados já apresentados pelas Amostras 06, 07, 08, 09 e 19, todas elas ensaiadas em tubos pequenos para altas frequências.

Em termos de comportamento, percebe-se uma elevação mais acentuada a partir da frequência de 2000 Hz, atingindo sua amplitude máxima na frequência de 4000 Hz, com índice de absorção $\alpha = 0,51$.

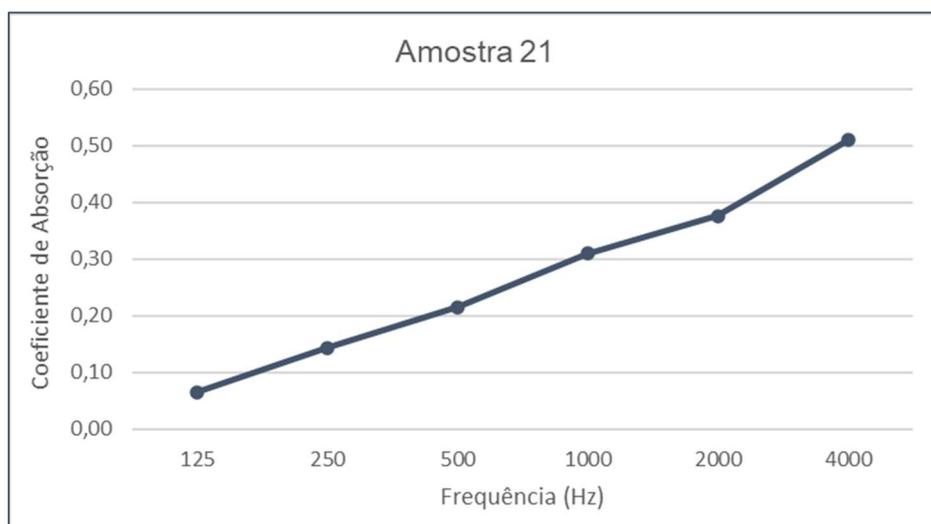


Figura 5.9 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, da Amostra 21

5.1.8 Coeficientes de Absorção x Variabilidades Físicas das Amostras

Nos itens anteriores, foram apresentados os resultados e as análises técnicas das amostras ensaiadas. O objetivo da apresentação das Figuras 5.10 e 5.11 não é comparar o desempenho entre os resultados, mas sim mostrar o reflexo da disparidade entre as curvas de absorção sonora em função das variabilidades físicas das amostras, tais como: volume, pressão de compactação, homogeneidade, entre outras, e sua influência nos resultados. As características físicas das amostras então registradas no Tabela 4.5 do item 4.3.9.

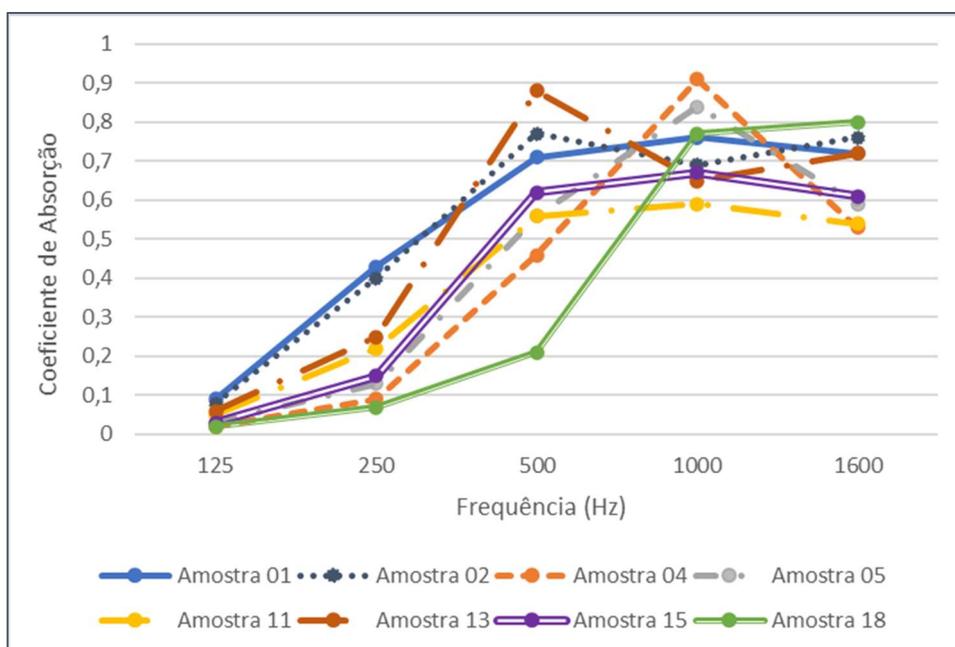


Figura 5.10 - Correlação entre os resultados de absorção sonora em função das variabilidades físicas das amostras de maior diâmetro

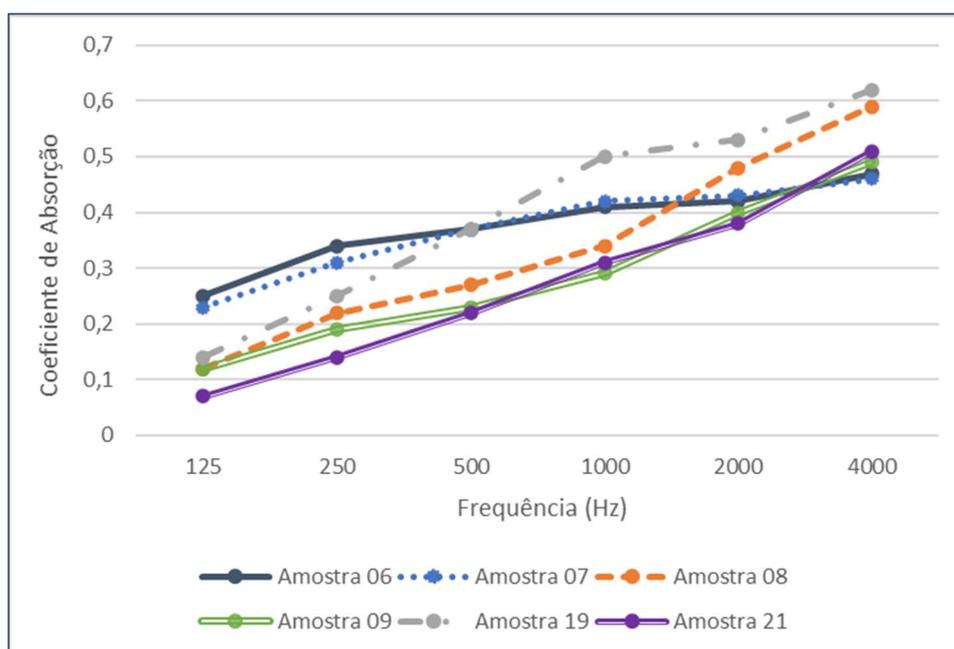


Figura 5.11 - Correlação entre os resultados de absorção sonora em função das variabilidades físicas das amostras de menor diâmetro.

5.1.9 Análise do Coeficiente de Absorção da Fibra do Colmo da Cana-de-Açúcar em relação a outros Produtos

A Tabela 5.2, apresenta um comparativo entre o desempenho dos coeficientes de absorção sonora da fibra do colmo da cana-de-açúcar, quando comparados com outros materiais, inclusive materiais consolidados em mercado.

Tabela 5.2 – Coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, de diferentes materiais *(Coco Verde@), **(Carvalho, 2019), ***(Rock Fibras@)

Material/ Espessura	Frequência (Hz) em Bandas de Oitava					
	125	250	500	1000	2000	4000
Fibra do Colmo da Cana - Amostra 13 (52 mm)	0,06	0,25	0,88	0,65	0,72	-
Fibra do Colmo da Cana - Amostra 19 (53 mm)	0,14	0,25	0,37	0,50	0,53	0,62
Fibra de Coco* (40 mm)	0,19	0,29	0,45	0,70	0,80	0,76
Fibra de Coco** (50 mm)	0,10	0,20	0,34	0,67	0,79	-
Painel PSL-32*** (51 mm)	0,16	0,52	0,82	0,92	0,94	0,96

Os valores do coeficiente de absorção sonora da fibra do colmo da cana-de-açúcar estão bem equiparados ou próximos dos valores de produtos de mercado com anos de existência. Acredita-

se que, com um pouco mais de estudo e aperfeiçoamento no desenvolvimento do aglomerado da fibra do colmo da cana-de-açúcar, os índices poderão melhorar.

5.2 Resultados do Ensaio de Resistividade ao Fluxo de Ar

Foram realizados ensaios de resistividade ao fluxo de ar (σ), em 4 amostras, visando trabalhos futuros, uma vez que a quantidade de amostras ensaiadas não é considerada representativa para chegar a conclusões sólidas.

Para fins de contextualização, resistividade ao fluxo de ar é um dos parâmetros utilizados para descrever o comportamento acústico de materiais porosos. Outros parâmetros também utilizados para esse fim são porosidade e tortuosidade. Segundo Cox e D'Antonio (2005), a resistividade do fluxo é uma medida de quão facilmente o ar pode entrar em um absorvedor poroso e a resistência que o fluxo de ar encontra através de uma estrutura, dando uma ideia de quanta energia sonora pode ser perdida devido aos efeitos da camada limite do material.

Para os ensaios de resistividade, foi utilizado o método do pistão, baseado na norma ISO 9053:1991 "Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance". As amostras ensaiadas foram: Amostras 04 e 11, de maior diâmetro e Amostras 06 e 07, de menor diâmetro. Foi necessário que todas as amostras passassem por ajustes em sua espessura para ficarem entre 17 e 20 mm, uma vez que o ensaio não possui boa performance para espessuras maiores. Além disso, as Amostras 04 e 11 tiveram seu diâmetro ajustado para que pudessem encaixar no tubo de ensaio que possui, aproximadamente, 27,5 mm.

A Figura 5.12, apresenta os resultados detalhados do ensaio de resistividade ao fluxo de ar:

<p>Amostra 04 Espessura do teste = 20 mm / diâmetro do teste = 27,5 mm $R_{lin} = 44282.3607 \pm 4516.0019 \text{ Ns/m}^4$ (não considera a compressão do ar na câmara) $R_{vol} = 45483.6628 \pm 4638.513 \text{ Ns/m}^4$ (considera a compressão do ar na câmara - resultado mais confiável) $u_{rms} = 5.0747 \text{ mm/s}$ (velocidade de vibração eficaz de movimento do pistão)</p>
<p>Amostra 11 Espessura do teste = 17 mm / diâmetro do teste = 27,5 mm $R_{lin} = 43278.3683 \pm 4413.6128 \text{ Ns/m}^4$ (não considera a compressão do ar na câmara) $R_{vol} = 44178.3729 \pm 4505.397 \text{ Ns/m}^4$ (considera a compressão do ar na câmara - resultado mais confiável) $u_{rms} = 5.023 \text{ mm/s}$ (velocidade de vibração eficaz de movimento do pistão)</p>
<p>Amostra 07 Espessura do teste = 19,5 mm / diâmetro do teste = 27,5 mm $R_{lin} = 122916.0122 \pm 12535.2157 \text{ Ns/m}^4$ (não considera a compressão do ar na câmara) $R_{vol} = 156328.5922 \pm 15942.6961 \text{ Ns/m}^4$ (considera a compressão do ar na câmara - resultado mais confiável) $u_{rms} = 4.9426 \text{ mm/s}$ (velocidade de vibração eficaz de movimento do pistão)</p>
<p>Amostra 06 Espessura do teste = 18 mm / diâmetro do teste = 27,5 mm $R_{lin} = 150007.6893 \pm 15298.078 \text{ Ns/m}^4$ (não considera a compressão do ar na câmara) $R_{vol} = 199069.6945 \pm 20301.5175 \text{ Ns/m}^4$ (considera a compressão do ar na câmara - resultado mais confiável) $u_{rms} = 4.9796 \text{ mm/s}$ (velocidade de vibração eficaz de movimento do pistão)</p>

Figura 5.12 – Resultados do ensaio de resistividade ao fluxo de ar

O resultado quanto à resistividade ao fluxo de ar das Amostras 04 e 11 não representam a amostra com maior diâmetro por completo (~ 97 mm), afinal, só foi possível a realização de um corte em cada amostra sem que elas se desmanchassem por completo. Além disso, pode ter ocorrido uma pequena compressão radial ao encaixar as Amostras 04 e 11 no tubo, conforme foi relatado pelo Prof. Paulo H. Mareze ao realizar os ensaios. Este ocorrido pode ter comprometido o resultado obtido de $\sigma = 45.000 \text{ Ns/m}^4$ onde a resistividade mais provável seria em torno de $\sigma = 40.000 \text{ Ns/m}^4$ para tais amostras.

Mesmo considerando $\sigma = 40.000 \text{ Ns/m}^4$ para as Amostras 04 e 11 é notável a diferença de resistividade em relação às Amostras 06 e 07, que foi em torno de $\sigma = 200.000 \text{ Ns/m}^4$. Concluindo que, para as Amostras 06 e 07 o ar possui mais dificuldade de flutuar pela

superfície. O motivo para diferença tão significativa entre os resultados das Amostras 04 e 11 em relação as Amostras 06 e 07, pode estar associado à sua densidade.

Conforme apresentado na Tabela 5.3, instrumento da tese de doutorado de Mareze (2013), se compararmos os resultados de resistividade ao fluxo de ar com outros materiais, o aglomerado do colmo do bagaço da cana-de-açúcar, apresenta índices excelentes.

Tabela 5.3 – Tabela adaptada de resistividade ao fluxo de ar de alguns materiais (Mareze, 2013)

Material	Resistividade ao fluxo [Ns/m ⁴]		
	ISO 9053 - Fluxo Alternativo	Ingard - Duto com 2 microfones	Ingard - Pistão por gravidade
Lã Rocha	20610	22065	29923
Flamex	10440	12334	14694
Alumínio	4715	6365	13965
Espuma	3365	5191	9558

5.3 Reação ao Fogo

Tendo esta pesquisa como objetivo desenvolver um novo material, com bom desempenho de absorção sonora e com características o mais próximo possível de um material comercializável, é fundamental que este material possua boa durabilidade, qualidade com custo-benefício, seja ambientalmente correto e, se tratando de um material com finalidade para condicionamento acústico, é essencial que tenha boa resistência à reação ao fogo.

Portanto, além dos ensaios de absorção sonora, foi realizado um teste simples de propagação de chamas em duas amostras do aglomerado do colmo do bagaço da cana-de-açúcar, sendo uma delas composta apenas da própria fibra e cola adesiva, e outra com adição de solução retardante de chamas para fibras naturais. A Figura 5.13 ilustra o teste.



Figura 5.13 – Amostra com adição de solução retardante a chamas submetida ao fogo (Autor)

Como resultado, a amostra com a solução retardante de chamas, foi submetida diretamente a chama durante 64 segundos, sem que houvesse a propagação das chamas através das fibras. Quando a chama do isqueiro foi cortada, o material apresentou apenas escurecimento da fibra, conforme mostrado na Figura 5.14.



Figura 5.14 – Resultado final após submissão da amostra com adição de solução retardante a chamas ao fogo (Autor)

Já, para a amostra sem a solução retardante de chamas, levou apenas 09 segundos para iniciar o processo de propagação das chamas na fibra, sendo que a chama do isqueiro foi mantida até

os 31 segundos e depois cortada; ao ser cortada, o material continuou em chamas até os 47 segundos e depois se apagou, a Figura 5.15 ilustra tal comportamento.



Figura 5.15 – Amostra sem adição de solução retardante a chamas submetida ao fogo (Autor)

Evidentemente que se trata de um teste simples, apenas para efeito de comparativo entre as amostras sem e com a solução retardante de chamas, não tendo sido o teste baseado em normas ou realizado por profissionais qualificados.

6 CONCLUSÕES

Mesmo se tratando de estudos preliminares, o objetivo proposto pela pesquisa foi alcançado com êxito, a fibra do colmo do bagaço da cana-de-açúcar se mostrou bastante interessante, apresentando índices de absorção sonora bem expressivos, indicando ser um material com possível potencial para fins comerciais, tendo como propósito trazer uma inovação sustentável para o mercado de materiais de condicionamento acústico para sons aéreos.

O desenvolvimento de um novo material acústico tendo como base as fibras naturais do colmo do bagaço da cana-de-açúcar, pode se tornar um marco inovador no contexto do desenvolvimento sustentável, para além do aspecto socioeconômico e das contribuições que pode trazer para a comunidade científica.

Os resultados obtidos são bastante satisfatórios e expressivos quando comparados com outros materiais, corroborando o objetivo desta pesquisa e evidenciando o potencial que o colmo do bagaço da cana-de-açúcar possui como material de absorção sonora. Em escala de bandas de oitava, foram obtidos índices com amplitudes de 91% ($\alpha = 0,91$) para médias frequências e amplitude de 62% ($\alpha = 0,62$) para altas frequências, o que não podemos classificar como resultado ruim.

Se considerarmos os resultados em escala linear de frequência, os resultados são ainda mais expressivos, alcançando amplitudes com índices chegando $\alpha = 1,00$, em faixa de médias frequências, conforme pode ser observado nas curvas das Amostras 13 e 05.

Outro resultado positivo da pesquisa está relacionado com a adição de aditivos retardante de chamas e preservante contra fungos e insetos, visando o desenvolvimento de um material o mais próximo possível de algo comercializável e impactando o mínimo em seu desempenho de absorção sonora. E, conforme pôde ser observado nos resultados, a adição dos aditivos não influenciou significativamente os mesmos.

Os resultados apresentados neste estudo estão sendo encarados pelo autor como uma abertura de portas para o desenvolvimento de novos estudos, que busquem alternativas de materiais de condicionamento acústico no âmbito da sustentabilidade.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aperfeiçoar o processo de confecção das amostras, principalmente em relação ao controle de dimensional, homogeneidade e pressão de compactação;
- Realizar uma análise de ciclo de vida para o aglomerado desenvolvido;
- Realizar uma análise de viabilidade econômica, avaliando se o material desenvolvido traria retorno financeiro ao investidor;
- Avaliar a possibilidade de adição de um segundo tipo de material sustentável buscando uma melhor performance e, quem sabe, aplicação para ruídos a som de percussão;
- Aprofundar o estudo quanto à resistividade ao fluxo de ar;
- Aprofundar o estudo quanto à resistência do material ao fogo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, Izabella V., Chaves, Renata C. F., Oliveira, Warlen L. de, Silva, Leticia O., Souza, Pollyanna M. de, Xavier, Alexandre A. B., “*Determinação do nível de absorção sonora de amostras constituídas por diferentes tipos de fibra de coco através de um tubo de impedância*”, INCNP Revista Iniciação Científica, 76-85 p., 2012/2013.

Bastos, Leopoldo Pacheco, “*Desenvolvimento e caracterização acústica de painéis multicamadas unifibra, multifibras e mesclados, fabricados a partir de fibras vegetais*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 157 p., 2009.

Battistelle, Rosane A.G., Marcilio, Carolina, Lahr, Francisco A.R., “*Emprego do bagaço (saccharum officinarum) e das folhas caulinares do bambu da espécie dendrocalamus giganteus na produção de chapas de partículas*”, Pesquisa e Tecnologia Minerva, Volume 5, Número 3, 297-305 p., 2008.

Bistafa, Sylvio R., “*Acústica aplicada ao controle do ruído*”, 3rd ed., São Paulo, Bluncher, 2018.

Brüel & Kjær@ <https://www.bksv.com/pt> . Brüel & Kjær (página internet oficial), Brasil, 2021.

Cao, Leitao, Fu, Qiuxia, Si, Yang, Ding, Bin, Yu, Jianyong “*Porous materials for sound absorption*”, Composites Communications 10, 25-35 p., 2018.

Carvalho, Patrícia Stefan de, “*Elaboração de um compósito a partir dos resíduos da cultura de girassol com propriedades de absorção sonora*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 94 p., Brasil, 2019.

Coco Verde@ <http://www.cocoverderj.com.br/tratamento-acustico.htm>. Coco Verde (página internet oficial), Brasil, 2022.

Cox, Trevor J., D’Antonio, Peter, “*Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*”, London, Spon Press, 2005.

Debatin, Martin C. B., Ruaro, Caroline L., Reichert, Gustavo, Ferreira, Marieli, Schardong, Samara I., Piovesan, Tenile R., “*Estudo da utilização de materiais alternativos como painéis de isolamento acústico*”, Salão do Conhecimento, XXVI Seminário de Iniciação Científica, 2018.

IBGE@ <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil> . Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (página internet oficial), Brasil, 2021.

Isbert, Antoni Carrión, “*Diseño acústico de espacios arquitectónicos*”, 1rd ed., Edicions UPC, 1998.

Mareze, Paulo Henrique, “*Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida*”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2013.

Norma ISO 10534-2 (2001), “*Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes - Part 2: Transfer-function method*”.

Norma ISO 9053 (1991), “*Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance*”.

Oliveira, Enio R. de, “*Procedimento e normas para o acompanhamento de análise da qualidade da cana-de-açúcar*”, ORPLANA Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil, 2013.

Outa, Roberto, “*Estudo e análise do coeficiente de absorção acústico do compósito da fibra da cana*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2014.

Outa, Roberto, Chavarette, Fabio R., Basquerotto, Cláudio H. C. C., Gonçalves, Aparecido C., “*Análise das características de absorção acústica e mecânicas das fibras vegetais alongadas mercerizada da cana e bambu*”, Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 21, No 2, 73-84 p., 2017.

Ramis, J., del Rey, R., Alba, J., Godinho, L., Carbajo, J., “*A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber*”, *Materiales de Construcción* 64 (313), January-March 2014.

Rock Fibras@ <http://rockfibras.com.br/la-de-rocha-thermax-paineis-psl-32/>. Rock Fibras (página internet oficial), Brasil, 2022.

Rodrigues, G.S.S.C., Ross, J.L.S., “*A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental*”, Uberlândia, EDUFU, 2020.

Yano, Bruna B. R., Silva, Sergio, A., M. da, Minillo, Larissa, “*Produção e avaliação de painéis aglomerados com resíduos de madeira e de bagaço de cana-de-açúcar*”, III CBCTEM Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, Florianópolis, 2017.