

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA ABSORÇÃO SONORA DE BORRACHA DE PNEU RECICLADO PARA
ISOLAMENTO E TRATAMENTO ACÚSTICO

por

Guilherme Schlatter

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, agosto de 2023

DADOS INTERNACIONAIS PARA CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Schlatter, Guilherme
Análise da Absorção Sonora de Borracha de Pneu
Reciclado para Isolamento e Tratamento Acústico /
Guilherme Schlatter. -- 2023.
18 f.
Orientadora: Leticia Fleck Fadel Miguel.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Absorção Sonora. 2. Borracha de Pneu Reciclado.
3. Tubo de Impedância. 4. Material Reciclável. I.
Fleck Fadel Miguel, Leticia, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Guilherme Schlatter

ANÁLISE DA ABSORÇÃO SONORA DE BORRACHA DE PNEU RECICLADO PARA
ISOLAMENTO E TRATAMENTO ACÚSTICO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientadora: Prof^ª. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof^ª. Letícia Fleck Fadel Miguel (Presidente)

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, setembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha família, pelo apoio, suporte e incentivo durante toda minha jornada até este momento.

Agradeço aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado e me ajudaram a superar os desafios vivenciados na faculdade.

Agradeço à minha orientadora, Professora Letícia, pela enorme disposição e apoio para a realização do trabalho.

Agradeço ao Engenheiro Edson da empresa Dipebor, pelo fornecimento do material utilizado para os testes.

Agradeço ao Professor Gildean, do Laboratório de Acústica e Vibrações da UFSC, pela imensa ajuda para a realização do trabalho, disponibilizando os equipamentos do laboratório e se dispondo a auxiliar na condução dos testes, sempre com muita atenção e disposição para o que fosse preciso, permitindo com que a execução deste trabalho fosse possível.

Schlatter, Guilherme. **Análise da absorção sonora de borracha de pneu reciclado para isolamento e tratamento acústico**. 2023. 18 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

O presente trabalho consiste na medição e análise do coeficiente de absorção sonora de borracha de pneu reciclado, material reciclável com grande disponibilidade nos centros urbanos, com o intuito de analisar sua viabilidade para aplicações de isolamento e tratamento acústico. Para isso, foram realizados testes em tubos de impedância com o material de borracha e com espumas de poliuretano, materiais já amplamente utilizados na indústria, para que se pudesse comparar as curvas de seus coeficientes de absorção sonora. Além disso, foram realizados testes sobrepondo os dois materiais para analisar os impactos nos resultados e a viabilidade da sua combinação para aplicações acústicas. Os resultados demonstram uma boa absorção sonora da borracha para faixas em torno de 2000 Hz, porém apresentando absorção inferior para o restante do espectro analisado. Para os materiais sobrepostos, obteve-se uma excelente curva de absorção sonora para uma ampla faixa de frequências, conforme exposto neste trabalho. É necessário, contudo, a realização de mais testes com a borracha submetida a processamentos industriais diferentes e testes com diferentes materiais sobrepostos a ela.

PALAVRAS-CHAVE: Absorção Sonora, borracha de pneu reciclado, material reciclável, tubo de impedância.

Schlatter, Guilherme. **Analysis of sound absorption of rubber from recycled tire for soundproofing and sound treatment**. 2023. 18 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

The present work consists in the measurement and analysis of the sound absorption coefficient of rubber from recycled tire, recyclable material with great availability in urban areas, with the aim to analyze its viability for soundproofing and acoustic treatment applications. For that purpose, tests in impedance tube were conducted with the rubber material and polyurethane foams, material already largely used in the industry, so that it was possible to compare its sound absorption curves. Besides, tests overlapping the two materials were made, aiming to analyze the impact on the results and the viability of its combination for acoustic applications. The results show a good sound absorption for the rubber in ranges around 2000 Hz, although showing inferior sound absorption in the rest of the analyzed spectrum. For the overlapped materials, it was obtained an excellent sound absorption curve for a wide frequencies range, as later shown in this work. It is necessary, however, the conduction of more tests with the rubber subjected to different industrial processes and tests overlapping it to different materials.

KEYWORDS: Sound Absorption, rubber from recycled tire, recyclable material, impedance tube.

NOMENCLATURA

Símbolos

E	Energia	
$H_{i,j}$	Função de transferência entre microfones i e j	
$H_{1,2}$	Função de transferência entre microfones 1 e 2	
$H_{2,1}$	entre microfones 2 e 1	
H_{cor}	Função de transferência entre microfones corrigida	
j	Componente complexa $\sqrt{-1}$	
k_0	Número de onda complexa no ar	$[m^{-1}]$
P_i	Pressão sonora no i-ésimo microfone	[Pa]
P_j	Pressão sonora no j-ésimo microfone	[Pa]
P_1	Pressão sonora no microfone 1	[Pa]
P_2	Pressão sonora no microfone 2	[Pa]
R_{cor}	Coefficiente de reflexão sonora corrigido	
S	Distanciamento entre microfones 1 e 2	[m]
x_1	Distância entre a amostra e o microfone 1	[m]

Símbolos Gregos

a	Coefficiente de absorção sonora
α_{cor}	Coefficiente de absorção sonora corrigido
ρ	Coefficiente de refletividade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
4.1 Definição de som e propriedades sonoras.....	3
4.2 Isolamento Acústico e Tratamento Acústico.....	4
4.3 Métodos para medição do coeficiente de absorção sonora.....	6
5. METODOLOGIA.....	9
6. RESULTADOS.....	11
7. CONCLUSÃO.....	15
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
9. ANEXO A.....	17

1. INTRODUÇÃO

Atualmente trata-se com mais seriedade que nunca os impactos ambientais gerados pela sociedade. Com a crescente preocupação com o meio ambiente e a necessidade de reduzir o impacto ambiental negativo de nossas atividades, diversas medidas estão sendo tomadas, sendo uma das mais comuns e mais efetivas a reciclagem. Existem diversas razões pelas quais a utilização de materiais reciclados é tão importante. Em primeiro lugar, a reciclagem reduz a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários [SACHS]. Ao reaproveitar materiais, estamos evitando a extração de novos recursos naturais e diminuindo a demanda por sua produção. Isso resulta em menos poluição do ar, da água e do solo, além de preservar habitats naturais que seriam destruídos pela extração de matérias-primas.

Além disso, a reciclagem contribui para a economia circular, um modelo que busca minimizar o desperdício e manter os recursos em circulação pelo maior tempo possível. Ao utilizar materiais reciclados, estamos fechando o ciclo de produção, evitando o descarte prematuro e promovendo a reutilização de recursos [BONCIU]. Isso gera, além dos benefícios ambientais citados, benefícios econômicos, como a criação de empregos na indústria da reciclagem e a redução dos custos de produção para empresas que utilizam materiais reciclados em seus processos.

Materiais reciclados são utilizados nas mais diversas indústrias e existem inúmeros estudos realizados em diferentes áreas para compreender a viabilidade de utilização de materiais que eventualmente seriam descartados [SACHS]. O escopo deste trabalho gira em torno de compreender a viabilidade do uso de materiais reciclados para fins de tratamento e isolamento acústico.

Atualmente, é comum utilizar para tratamento ou isolamento acústico lãs de fibra e de rocha, espumas de poliuretano, painéis de fibra de madeira, massa viscoelástica, entre outros materiais [ALMEIDA]. Já tratando-se de materiais reciclados, o material mais comum utilizado é a Lã de PET, obtida a partir da reciclagem de garrafas plásticas de polietileno tereftalato (PET).

Uma das maneiras de se medir a capacidade de tratamento/isolamento acústico de um material é através da análise do seu coeficiente de absorção sonora. O coeficiente de absorção sonora é uma medida que indica a capacidade de um material em absorver o som incidente, sendo representado por um valor que varia de 0 a 1. O valor 0 para o coeficiente indica que o material não absorve som algum, refletindo totalmente o som incidente, e 1 indica que o

material absorve totalmente o som, sem refleti-lo de volta ao ambiente. Valores intermediários entre 0 e 1 indicam o grau de absorção parcial do som. É importante ressaltar que existem diversas propriedades que podem alterar o coeficiente de absorção de um material, sendo espessura e densidade as mais importantes delas [GERGES].

Além da capacidade de isolamento e tratamento acústico, o coeficiente de absorção sonora ainda pode fornecer informações úteis a respeito de outras aplicações acústicas para o material estudado, como a sua utilização para controle de ruído de impacto, onde deseja-se minimizar os efeitos sonoros para faixas específicas de frequência.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo analisar o coeficiente de absorção sonora de borracha de pneu reciclado, de maneira que seja possível avaliar a sua viabilidade técnica para tratamento/isolamento acústico e aplicações relacionadas. Para isso, serão efetuados ensaios em tubo de impedância do material de borracha e de espumas de poliuretano, para que se possa obter e comparar as curvas de absorção sonora dos materiais e realizar a análise. Além disso, serão realizados testes com os dois materiais sobrepostos, para que se possa compreender o efeito da combinação de materiais e o seu potencial para soluções acústicas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de tubo de impedância para determinação do coeficiente de absorção sonora foi primeiramente desenvolvida por Seybert e Ross, em 1977. A norma utilizada para ensaios em tubo de impedância é a norma ISO 10534 - *Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes*. Ela é dividida em 2 partes, tendo a primeira parte sido publicada em 1996, “ISO 10534-1 – Part 1: *Method using standing wave ratio*”, e a segunda parte, “ISO 10534-2 - Part 2: *method using two microphones*” em 1998.

BONATTI (2022) em seu trabalho de conclusão de curso em engenharia mecânica realizou ensaios em tubo de impedância para materiais recicláveis, testando espuma de PET e caixas de ovos de papelão, obtendo resultados satisfatórios para ambos os materiais, porém salientando que mais ensaios seriam necessários para obter resultados mais assertivos para as caixas de ovos.

SARAIVA (2017) em sua tese de mestrado realizou a caracterização de um compósito com casca de arroz e granulado de borracha, variando o percentual de granulado e casca de arroz em 2 amostras diferentes. A amostra com mais granulado apresentou melhores propriedades sonoras que a com menos granulado.

ALENCAR (2019) em sua tese de mestrado realizou ensaios com um compósito expandido de borracha natural com madeira, concluindo que os resíduos carregados influenciavam na absorção sonora do material.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Definição de som e propriedades sonoras

Gerges (2000) caracteriza o som por flutuações de pressão em um meio compressível, ressaltando que a sensação do som apenas ocorrerá quando a amplitude destas flutuações e a frequência com que se repetem estiverem dentro de determinadas faixas de valores. Ademais, Gerges aponta que o som é uma forma de energia que é transmitida pela colisão das moléculas do meio, umas contra as outras, sucessivamente. Portanto, é possível representá-lo por uma série de compressões e rarefações do meio em que se propaga, a partir da fonte sonora. Ele também ressalta que na propagação do som não há deslocamento permanente de moléculas, de modo que não há transferência de matéria, apenas de energia.

Ao momento em que o som incide sobre determinada superfície, ele pode ser refletido, absorvido ou transmitido. Tal comportamento dependerá do ângulo de incidência e das propriedades e características do material que compõem a superfície em que o som está incidindo. A figura 1 representa um esquema exemplificativo de uma onda sonora incidindo sobre uma superfície plana:

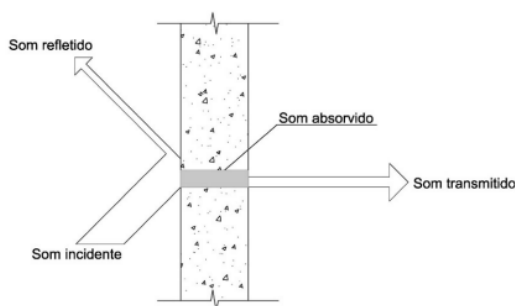


Figura 1: Onda sonora incidindo sobre superfície plana. [Fonte: USP Disciplinas – Acústica de Salas]

O coeficiente de absorção sonora (α) pode ser definido como a capacidade do material de absorver o som. Para essa definição, considera-se tanto a energia absorvida como a energia transmitida como uma só, de maneira que o resultado da incidência sonora em uma superfície resume-se a energia refletida ou energia absorvida. Assim, em contrapartida ao coeficiente de absorção sonora, há a refletividade (ρ), definida com a capacidade de uma superfície de refletir som. Ambas as propriedades variam de 0 (mínimo) a 1 (máximo), sendo $\alpha=0$ ($\rho=1$) para uma superfície puramente refletora, e $\alpha=1$ ($\rho=0$) para uma superfície puramente absorvedora. Estas propriedades podem ser descritas através das seguintes equações:

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

$$\rho = \frac{E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2)$$

As propriedades do material que afetam o coeficiente de absorção sonora incluem sua porosidade, densidade, rigidez, espessura e rugosidade da superfície. Materiais porosos com superfícies rugosas e elevada espessura têm maior capacidade de absorver o som, resultando em um coeficiente de absorção mais alto. Essas características permitem que o som penetre, dissipando sua energia por meio do movimento das partículas sonoras e da interação com a estrutura do material.

4.2 Isolamento Acústico e Tratamento Acústico

O isolamento acústico é um conjunto de técnicas e medidas aplicadas com o objetivo de reduzir a transmissão de ruídos indesejados entre ambientes. Essa transmissão pode ocorrer por meio de vias áreas, estruturais ou de flancos. Através da utilização de materiais específicos, vedação de flancos e técnicas para minimizar propagação de som e vibrações, é possível obter bons resultados de isolamento acústico e criar espaços com menor interferência sonora.

Atualmente, as principais técnicas utilizadas para isolamento acústico na construção civil consistem em:

1. Isolamento de paredes utilizando materiais de alta densidade, como drywall com camadas de isolamento acústico entre as placas, para criar uma barreira física que minimize a transmissão de som através das paredes. A Figura 2 representa um esquema do modelo de paredes drywall.

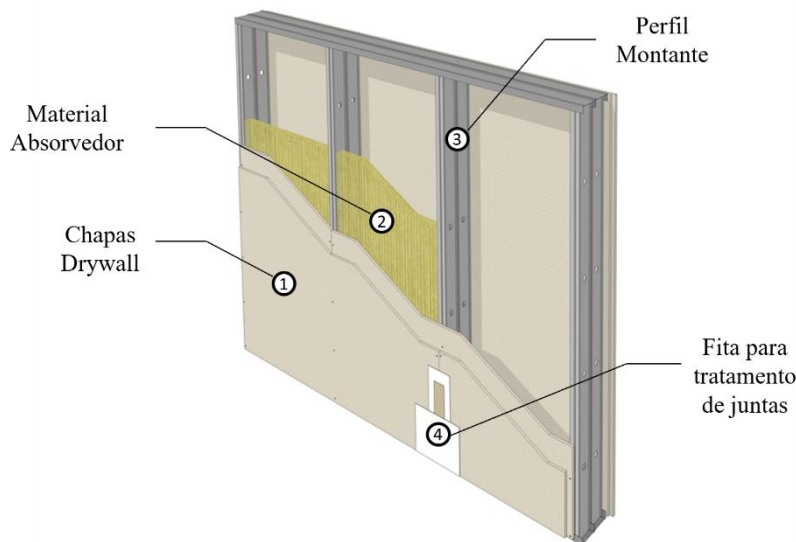


Figura 2: [Fonte: Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG]

2. Isolamento de pisos e tetos: Similar ao isolamento de paredes, o isolamento de pisos e tetos envolve o uso de materiais de isolamento acústico para criar uma barreira efetiva contra a transmissão sonora entre diferentes pavimentos ou andares.
3. Tratamento de janelas e portas: Janelas e portas são pontos vulneráveis para a transmissão de som. O uso de janelas duplas com vidro laminado e juntas de vedação eficientes, assim como portas maciças e bem ajustadas, ajuda a minimizar a entrada de ruídos externos.
4. Isolamento de flancos: Os flancos são rotas secundárias pelas quais o som pode se propagar. É importante identificar esses pontos e tomar medidas para vedá-los ou utilizar materiais isolantes ao redor dessas aberturas.

Além de isolar a entrada e saída de ruídos externos, é importante considerar a absorção sonora interna do ambiente, o que envolve o tratamento acústico interno. O objetivo do tratamento acústico é reduzir a reverberação do som dentro do espaço, controlando a reflexão

do som e minimizando ecos, de maneira que se obtenha uma melhor qualidade do som no ambiente.

As principais técnicas para tratamento acústico consistem na utilização de dispositivos acústicos, como:

1. Painéis acústicos compostos por materiais absorvedores porosos, como espumas e lãs minerais. Estes painéis podem ser planos ou ainda dispostos em formas geométricas distintas, quando são chamados de difusores e atuam dispersando as ondas sonoras em várias direções, criando uma distribuição mais homogênea do som e potencializando a absorção ao aumentar o número de reflexões. Em geral são melhores absorvedores para médias e altas frequências.
2. Absorvedores ressonantes. Podem ser do tipo painel ou placa perfurada e o do tipo membrana. Estes dispositivos têm como princípio de funcionamento o ressonador de Helmholtz, cujas explicações conceitual e analítica podem ser encontradas na dissertação de ALMEIDA, 2019. Estes dispositivos são ideais para absorção sonora de baixas frequências.

4.3 Métodos para medição do coeficiente de absorção sonora

Os dois principais métodos utilizados para a medição do coeficiente de absorção sonora de um material são o método da reverberação e o método do tubo de impedância.

1. Método da reverberação: Nesse método, o material a ser testado é colocado em uma sala reverberante. A sala reverberante é um ambiente especialmente projetado com superfícies altamente refletivas, onde as ondas sonoras refletem repetidamente nas paredes, teto e piso, criando uma reverberação prolongada. O material é instalado em uma posição específica na sala e, em seguida, um som de referência é emitido. São realizadas medições precisas dos níveis de som no ambiente com e sem o material presente. A diferença entre essas medições é usada para determinar a capacidade de

absorção sonora do material em diferentes frequências. Esse método é amplamente utilizado e é padronizado pela norma ISO 354:2003 “*Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*”.

2. Método do Tubo de impedância: O método do tubo de impedância, o qual será o escopo deste trabalho, é uma técnica utilizada para medir o coeficiente de absorção sonora de materiais finos e flexíveis, como espumas e fibras. Ele é baseado na análise da impedância acústica do material em diferentes frequências. A medição é realizada em um equipamento chamado tubo de impedância, representado na figura a seguir:

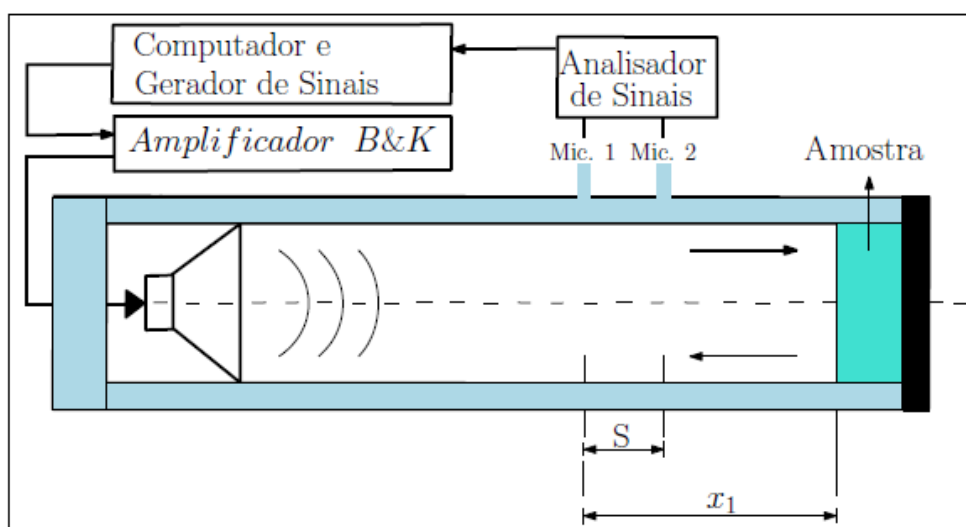


Figura 3: Representação Esquemática de Tubo de Impedância. [Fonte: Almeida (2021)]

O tubo de impedância consiste em um tubo cilíndrico com duas extremidades: uma delas fechada, onde é posicionado um alto falante, e a outra aberta, onde é fixado o material, formando uma barreira para as ondas sonoras. Entre as duas extremidades posiciona-se dois microfones para efetuar a medição. Inicialmente, uma onda sonora é gerada pelo alto falante, viajando ao longo do tubo. À medida que a onda sonora encontra o material, parte dela é absorvida e parte é refletida. A quantidade de energia sonora refletida e absorvida pelo material é medida através da análise da impedância acústica.

A impedância acústica é uma medida da oposição oferecida pelo material ao fluxo da onda sonora, e depende da densidade e da velocidade do som no material. Ao realizar medições em diferentes frequências, é possível obter informações sobre o desempenho acústico do material em diferentes faixas de frequência. Durante o teste, são registradas as medidas da

impedância acústica do tubo tanto com o material presente como sem ele. A diferença entre essas medidas é utilizada para calcular o coeficiente de absorção sonora do material em cada frequência específica.

O método do tubo de impedância é padronizado pela norma ISO 10534-2:1998 “Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes”, que define os procedimentos e as condições de teste a serem seguidos.

De acordo com Almeida (2021) Para determinar o coeficiente de absorção pelo método do tubo de impedância, é necessário primeiramente medir as pressões sonoras entre os microfones, para que seja possível calcular a função resposta em frequência (FRF) (também chamada de função transferência), sendo a mesma obtida por meio da razão entre a pressão no i -ésimo microfone e a pressão no j -ésimo microfone, conforme a Equação 3:

$$H_{i,j} = \frac{P_i}{P_j} = \frac{P_1}{P_2} \quad (3)$$

Entretanto, em virtude da diferença de fase existente entre os microfones utilizados nos ensaios, é comum apresentarem erros de mensuração. Para atenuar este erro a norma ISO 10534-2 sugere um procedimento de calibração, o qual consiste na obtenção de uma função de transferência corrigida, para a qual se deve realizar a mudança de posições entre os microfones utilizados, ou seja, o microfone 1 ocupa a posição que era do microfone 2 e vice-versa. Assim, obtém-se a função transferência corrigida pela raiz quadrada da razão entre as funções transferências obtidas nas diferentes posições dos microfones, conforme a equação 4.

$$H_{cor} = \left(\frac{H_{1,2}}{H_{2,1}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Obtendo-se função transferência corrigida, é possível determinar o coeficiente de reflexão, de acordo com a equação 5:

$$R_{cor} = \frac{H_{cor} - e^{-jk_0S}}{e^{jk_0S} - H_{cor}} e^{j2k_0x_1} \quad (5)$$

em que k_0 é o número de onda do ar. Apesar da norma sugerir a utilização de um \tilde{k} complexo, adota-se aqui k_0 pois esta formulação foi utilizada por Dupont et al., (2011) de maneira satisfatória. Consequentemente, o coeficiente de absorção sonora é dado pela Equação 6:

$$\alpha_{cor} = 1 - |R_{cor}|^2 \quad (6)$$

5. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a realização do trabalho consiste na seleção de amostras e realização do ensaio em tubo de impedância conforme a norma ISO 10534-2:1998 “*Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes*”.

Como explicado anteriormente, o ensaio em tubo de impedância se dá através da fixação de uma determinada amostra em uma das extremidades do tubo, enquanto uma onda sonora é emitida na outra extremidade e a pressão sonora é captada por dois microfones posicionados ao longo do tubo. Através das pressões sonoras obtidas, calcula-se o coeficiente de absorção sonora através da metodologia matemática descrita anteriormente.

Os testes em tubo de impedância realizados para este trabalho foram feitos no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A lista de equipamentos pertencente ao laboratório utilizada nos testes está descrita na tabela a seguir:

Tabela 1: Lista de equipamentos utilizados nos testes

Item	Quantidade	Descrição
1	1	Analisador de sinais B&K Pulse 6 canais
2	1	Desktop Windows XP com software BK connect
3	2	Microfones Bruel & Kjaer tipo 4189-A-021
4	1	Calibrador Bruel & Kjaer tipo 4231
5	1	Amplificador de potência Bruel & Kjaer tipo 2718
6	1	Tubo de impedância com 26 mm de diâmetro interno

As fotos do analisador de sinais, microfones, calibrador e amplificador de potência utilizados podem ser vistas no Anexo A do trabalho. O tubo de impedância utilizado para os testes pode ser visualizado nas imagens a seguir:

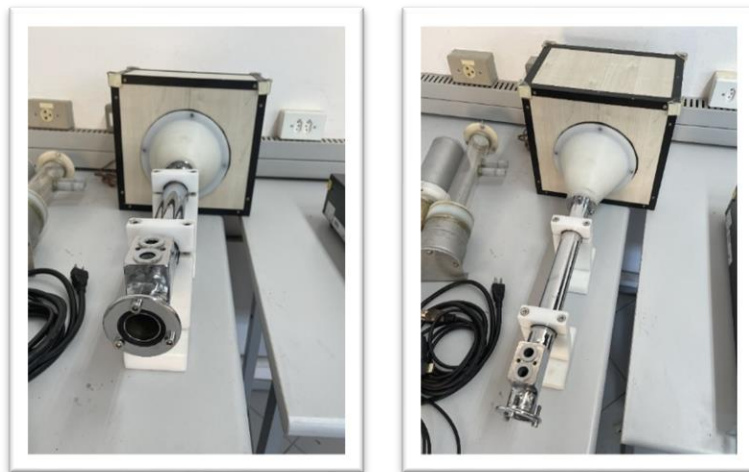


Figura 4: Tubo de bioimpedância

Para a realização dos ensaios, foram utilizados 3 tipos de materiais diferentes, conforme descrito na Tabela a seguir:

Tabela 2: Descrição dos materiais utilizados nos ensaios

Material	Nº de Amostras	Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)
Espuma 1	6	18	20
Espuma 2	6	27	20
Borracha de Pneu Reciclado	6	930	20

Ambas as espumas são de poliuretano, diferindo entre si apenas em suas densidades, e foram adquiridas na loja Central das Espumas, em Porto Alegre/RS. O material de borracha de pneu reciclado foi adquirido na Empresa de materiais de borracha Dipebor, também em Porto Alegre/RS, e se trata de uma placa compacta feita a partir de borracha reciclada de pneu triturada. Vale ressaltar que este material não é padronizado, podendo ser comercializado por diferentes empresas com diferentes densidades, o que influenciará no seu desempenho acústico.

Todos os materiais foram adquiridos em placas e posteriormente cortados para as espessuras desejadas na furadeira de bancada da marca Somers pertencente ao próprio laboratório,

À ponta da furadeira foi indexado um corta-amstras próprio do laboratório, com o intuito de deixá-las com os mesmos diâmetros de 26 mm e se encaixarem adequadamente na extremidade do tubo. As amostras foram enumeradas de 1 a 18, A seguir é possível visualizar as amostras separadamente e encaixadas no tubo:



Figura 5: Visualização das amostras

6. RESULTADOS

Conforme descrito anteriormente, o coeficiente de absorção sonora é obtido através da obtenção da pressão sonora nos microfones utilizando o software BK connect e posterior cálculo das variáveis e visualização dos resultados através do programa MatLab.

Para a Espuma 1, de menor densidade, obtiveram-se as seguintes curvas de absorção sonora:

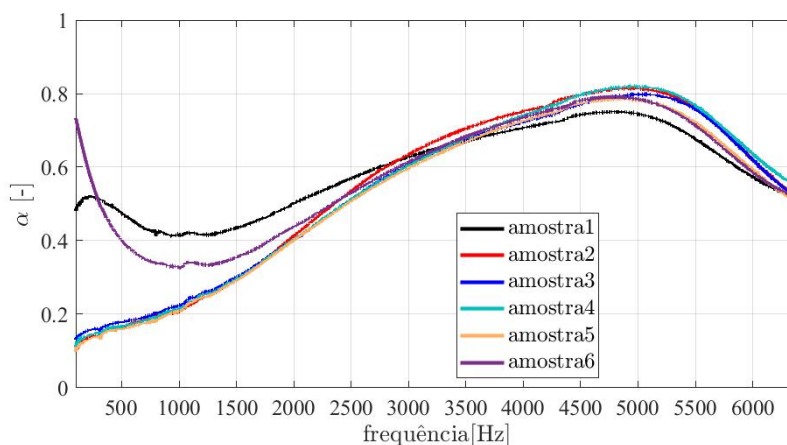


Figura 6: Curva de absorção sonora da Espuma 1

É possível observar que o coeficiente de absorção sonora médio se mantém abaixo de 0,4 para frequências abaixo de 2000 Hz. A partir desta faixa, o coeficiente cresce gradativamente conforme aumenta-se a frequência até atingir o pico de aproximadamente 0,8 em frequências de 4500 – 5000 Hz, passando a decair após esta faixa. É válido ressaltar que as altas divergências nos valores iniciais se devem a pequenas divergências na montagem, em função da pressão exercida no corte das amostras pela furadeira que pode ter causado pequenas deformações nas amostras de menor densidade e alterado os seus diâmetros.

Para a Espuma 2, de maior densidade, obtiveram-se as seguintes curvas de absorção sonora:

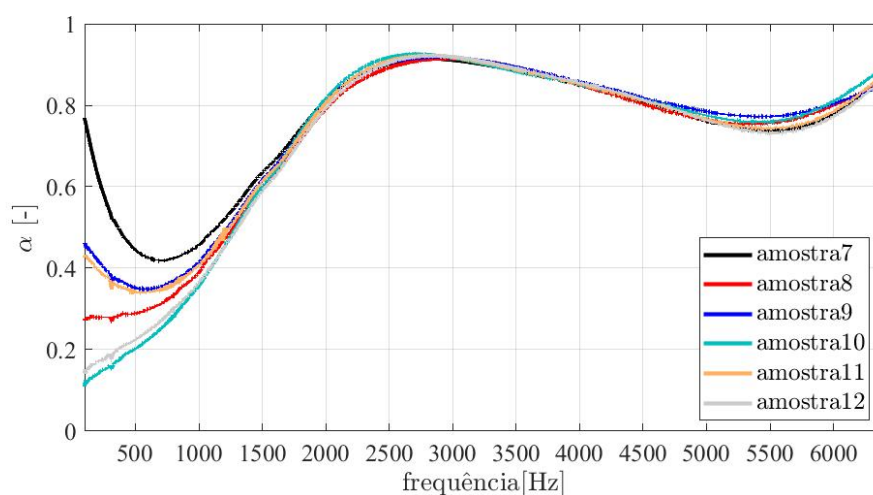


Figura 7: Curva de absorção sonora da Espuma 2

É possível analisar que o coeficiente de absorção sonora médio foi superior, para a maior parte da faixa de frequências, ao da espuma 1, principalmente por sua maior densidade. Observa-se que o coeficiente de absorção sonora médio atinge o valor de 0,4 a partir de 1000 Hz, aumentando rapidamente e atingindo valores superior a 0,8 já a partir de 2000 Hz, se mantendo neste patamar com variação aproximada de +- 0,1 por todo espectro de frequências medido.

Para a borracha de pneu reciclado, obteve-se as seguintes curvas de absorção sonora:

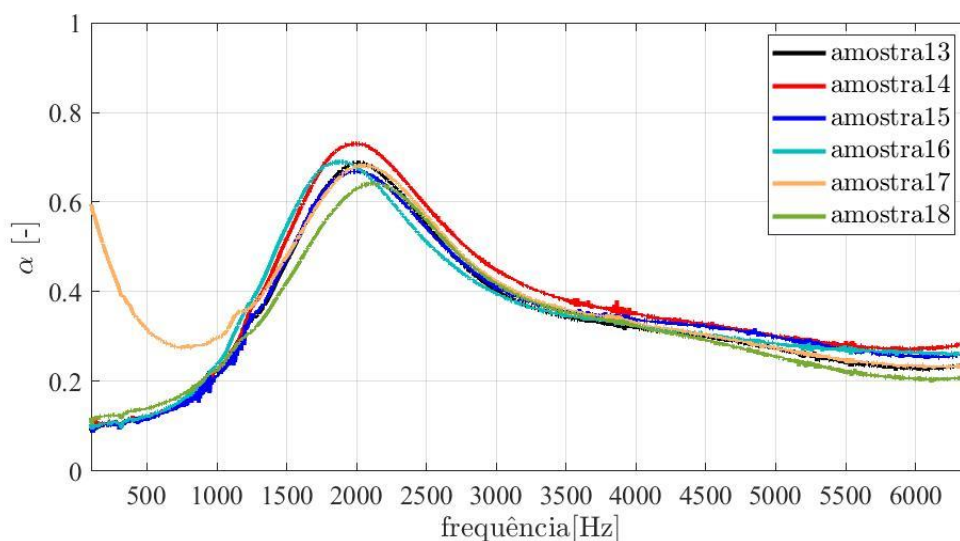


Figura 8: Curva de absorção sonora da Borracha de Pneu Reciclado

É possível analisar que a borracha atinge níveis de coeficiente de absorção sonora superiores a 0,4 a partir de 1500 Hz, atingindo um pico de aproximadamente 0,7 na faixa de 2000 Hz e voltando a patamares inferiores a 0,4 a partir de 3000 Hz. Desta forma, interpreta-se que a borracha tenha desempenhos equivalentes aos das espumas nas faixas em torno de 2000 Hz, porém sua absorção sonora fica aquém à das espumas a partir de 3000 Hz.

A partir dos resultados individuais obtidos, optou-se por realizar ensaios com a borracha sobreposta às espumas, a fim de compreender os resultados e analisar a sobreposição dos materiais como possível solução acústica.

A seguir, é possível analisar as curvas de absorção sonora da borracha de pneu reciclado sobreposta à espuma 1:

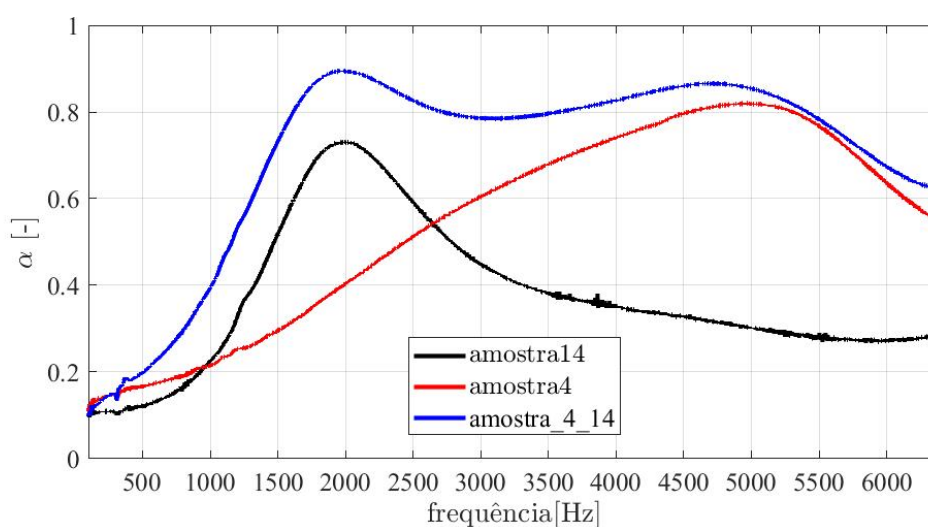


Figura 9: Curva de absorção sonora da borracha sobreposta à espuma 1

A curva preta equivale à curva de uma das amostras da borracha de pneu reciclado, a curva vermelha a uma das amostras da espuma 1, e a curva azul à sobreposição das amostras. É possível analisar que os materiais atuam muito bem complementarmente, uma vez que a borracha tem melhores capacidades da absorção para faixas mais baixas de frequências, e a espuma para faixas mais elevadas, além do efeito causado pela maior espessura em virtude da sobreposição dos materiais. A curva azul demonstra que, com a sobreposição da borracha à espuma, obtém-se coeficientes de absorção sonora acima de 0,4 para frequências a partir de 1000 Hz, atingindo um pico de aproximadamente 0,9 em 2000 Hz e se mantendo em patamares acima de 0,8 até 5500 Hz, quando começa a diminuir.

Os resultados da borracha sobreposta à espuma 2 podem ser visualizados no gráfico a seguir:

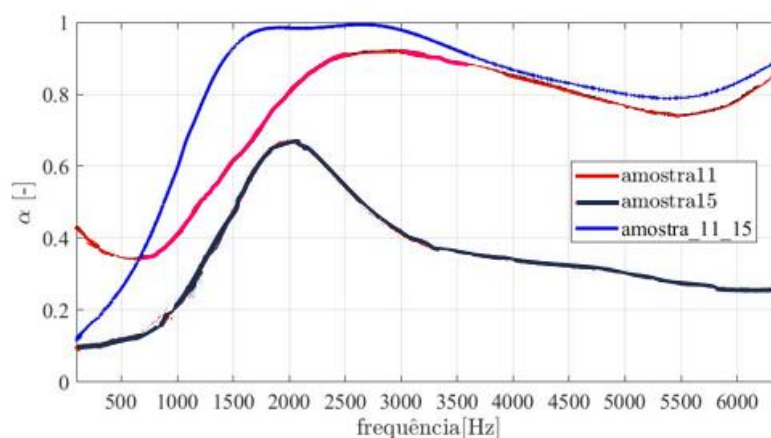


Figura 10: Curva de absorção sonora da borracha sobreposta à espuma 2

A curva preta equivale à curva de uma das amostras da borracha, a curva vermelha equivale a uma das amostras da espuma 2 e a curva azul à sobreposição das amostras. É possível observar que a espuma de poliuretano de maior densidade contém um coeficiente de absorção sonora superior ao da borracha para todo o espectro de frequências analisado, porém, quando sobrepostas, resultam em um coeficiente de absorção sonora ótimo, com valores superiores a 0,4 a partir de aproximadamente 750 Hz que aumentam rapidamente até atingirem um coeficiente de absorção próximo do nível máximo (1) na faixa de 1600 a 3000 Hz, a partir de então diminuindo moderadamente para patamares próximos a 0,8.

7. CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas é possível concluir que o material de borracha de pneu reciclado por si só possui um bom coeficiente de absorção sonora para uma faixa de frequências muito específica em torno de 2000 Hz, sendo sua utilização recomendada para soluções acústicas de ruído de impacto, onde se deseja isolar sons para frequências específicas. Para demais faixas de frequência, o material mostrou certo nível de absorção sonora, porém insuficiente para aplicações em situações reais.

Apesar disso, foi possível observar que, ao combinar o material de pneu de borracha reciclado com as espumas acústicas, foram obtidos excelentes níveis de absorção sonora para uma ampla faixa de frequências, mostrando que os materiais podem ser complementares neste quesito e esta combinação pode se tratar de uma boa solução acústica para aplicações reais, de maneira que é possível simultaneamente obter um coeficiente de absorção sonora maior e reduzir o impacto ambiental.

Para trabalhos futuros, seria recomendado testar a borracha de pneu reciclado sobreposta a outros materiais com boas propriedades de absorção sonora, como lãs minerais e outros tipos de espuma, observando e comparando os resultados. Também poderiam ser analisadas borrachas de pneu submetidas a outros processamentos industriais, de forma que pudesse se analisar sob quais propriedades físicas o material obtém os melhores coeficientes de absorção sonora.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, L. N. Compósito expandido de borracha natural com madeira: materiais para isolamento térmico e acústico na construção civil. Presidente Prudente, UNESP, 2019.

ALMEIDA, Gildean do Nascimento. **Análise de um metamaterial acústico do tipo labiríntico na absorção sonora de baixas frequências**. 2019. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**, Edgard Blücher, Brasil, 2ª edição, 2006.

BONATTI, ENIO CORRÊA. **Análise da viabilidade de utilização de materiais recicláveis para isolamento acústico**. 2022.

BONCIU, F. **The European Economy: From a Linear to a Circular Economy**. Romanian Journal of European Affairs, 2014.

DUPONT, T. et al. **Acoustic properties of air - saturated porous materials containing dead - end porosity**. Journal of Applied Physics, AIP, v. 110, n. 9, p. 094903, 2011.

GERGES, S.N.Y. **Ruído: fundamentos e controle**. 2ª ed. Florianópolis: NR, 2000.

ISO 10534-2:98. **Acoustics. Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes” – Part 2: Transfer function**, Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), USA, 1998.

MIGUEL, L. F. F. **Tópicos de Acústica Aplicada**. 1ª ed. Porto Alegre, 2007.

MURGEL, E. **Fundamentos de Acústica Ambiental**. São Paulo: Senac, 2007.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

SARAIVA, R.V. **Caracterização de um compósito com casca de arroz e granulado de borracha**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2017.

SEYBERT, A.; ROSS, D. **Experimental determination of acoustic properties using twomicrophones random-excitation technique**, The Journal of the Acoustical Society of America, 1977.

VEIGA, J. E. **Indicadores socioambientais: evolução e perspectivas**. Revista de Economia Política, 2009.

VELAZQUEZ, L., MUNGUÍA, N., PLATT, A., & TADDEI, J. **Sustainable university: what can be the matter?** Journal of Cleaner Production, 2006.

9. ANEXO A

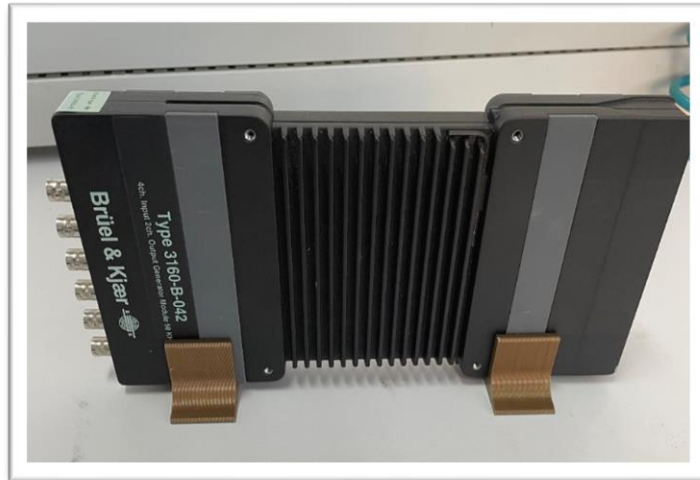


Figura 11: Analisador de sinais utilizado nos ensaios



Figura 12: Microfone utilizado nos ensaios



Figura 13: Calibrador utilizado nos ensaios



Figura 14: Amplificador utilizado nos ensaios