

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

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS RECICLÁVEIS PARA
ISOLAMENTO ACÚSTICO

por

Enio Corrêa Bonatti

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, maio de 2022

Bonatti, Enio Corrêa
ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS
RECICLÁVEIS PARA ISOLAMENTO ACÚSTICO / Enio Corrêa
Bonatti. -- 2022.
15 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, 2022.

1. Acústica. 2. Coeficiente de absorção sonora. I.
Miguel, Leticia Fleck Fadel, orient. II. Título.

Enio Corrêa Bonatti

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS RECICLÁVEIS PARA
ISOLAMENTO 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. CIRILO SEPPI BRESOLIN
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof.^a Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof.^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, maio de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Maria José da Silva Corrêa por todo empenho em me proporcionar condições de estudo que se materializam neste Trabalho de Conclusão de Curso. Adicionalmente, agradeço a toda minha família pelo apoio nas minhas escolhas e incentivo para seguir em frente nos momentos difíceis. Agradeço à minha companheira Maiara Severo por ter sido um porto seguro desde o momento que nos conhecemos.

Agradeço aos amigos que a Universidade me proporcionou conhecer e que tornaram este período especial, aos amigos de infância que acompanharam meu desenvolvimento e continuam presentes em minha vida e a todos os colegas de curso que em algum período manteve contato e contribuíram para minha formação.

Gostaria de agradecer aos docentes do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, à equipe do Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC e, especialmente, ao Giordano Demoliner pelo apoio na realização dos ensaios para este trabalho.

Somos o que fazemos, mas somos, principalmente, o que fazemos para mudar o que somos.

Eduardo Galeano

BONATTI, E. C. **Análise da viabilidade de utilização de materiais recicláveis para isolamento acústico**. 2022. 15 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a capacidade de absorção sonora de dois materiais reciclados: lã de PET e papelão extraído de caixas de ovos. Para isso, foram realizados ensaios em tubo de impedância, de acordo com a norma ISO10534-2, para posterior comparação entre as curvas do coeficiente de absorção sonora destes materiais com as curvas obtidas para espumas comerciais de poliuretano. Os resultados confirmam o potencial da lã de PET – material já comercializado - como bom absorvedor acústico e demonstram a boa capacidade de absorção acústica média das amostras de papelão extraído de caixas de ovos. Porém, é necessário um maior aprofundamento na análise, considerando maior número de amostras e testes em Câmara Reverberante para resultados ainda mais assertivos.

PALAVRAS-CHAVE: lã de PET; papelão extraído de caixas de ovos; absorção sonora; tubo de impedância.

BONATTI, E. C. **Analysis of the viability of using recycle materials for acoustic insulation**. 2022. 15 pages. Monograph of Final Paper of the Course in Mechanical Engineering – Mechanical Engineering Course, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

The present work aims to analyze the sound absorption of two recycled materials: PET wool and cardboard extracted from egg cartons. For this, tests were accomplished in impedance tube, according to the ISO 10534-2 standard, for later comparison between the curves of the sound absorption coefficient of these materials with the curves obtained from commercial polyurethane foams. The results confirm the potential of PET wool – a material already commercialized – as a good acoustic absorber and demonstrate the good capacity of the average acoustic absorption of cardboard samples extracted from egg cartons. However, further analysis is needed considering a greater number of samples and tests in Reverberation Room for even more assertive results.

KEYWORDS: PET wool; cardboard extracted from egg cartons; sound absorption; impedance tube.

NOMENCLATURA

Símbolos

c_0	Velocidade de propagação do som no interior do tubo de impedância	$\left[\frac{m}{s}\right]$
d	Diâmetro interno do tubo de impedância	$[m]$
f	Frequência da onda sonora emitida	$[Hz]$
f_u	Frequência de corte para ensaios em tubo de impedância	$[Hz]$
$H(f)$	Função de transferência entre microfones	
$H^*(f)$	Função de transferência corrigida entre microfones	
$H_{12}(f)$	Função de transferência calibrada entre microfones	
k_0	Número de onda complexo no ar	
$P_n(f)$	Pressão sonora captada pelo microfone n	$[Pa]$
R	Coeficiente de reflexão sonora	
s	Distanciamento entre microfones	$[m]$
T	Temperatura no interior do tubo de impedância	$[K]$

Símbolos gregos

α	Coeficiente de absorção sonora	
ρ	Refletividade sonora	
ω	Frequência angular	$\left[\frac{rad}{s}\right]$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1. PROPRIEDADES SONORAS	2
4.2. MATERIAIS ABSORVEDORES	3
4.3. MÉTODO PARA MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA	4
5. METODOLOGIA	6
6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	6
6.1. DETERMINAÇÃO DA FAIXA DE FREQUÊNCIA	6
6.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	7
7. RESULTADOS	9
8. CONCLUSÕES	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
ANEXOS	14

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento do sistema produtivo atual e o contínuo aumento de demanda por materiais, equipamentos e serviços, pressiona-se o meio ambiente para a obtenção de matérias-primas. Por este motivo torna-se cada vez mais urgente a busca por soluções mais sustentáveis e que deem o retorno esperado tecnicamente.

O conceito de Economia Circular surge em oposição ao modelo Linear, trazendo alternativas relativas à reutilização de resíduos de uma indústria como matéria-prima reciclada de outra indústria. Segundo dados de 2020 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, o Brasil emprega 307 mil trabalhadores, entre diretos e temporários, em serviços relacionados aos resíduos sólidos urbanos. Ainda, de acordo com o órgão, estima-se que o Brasil recuperou 1,07 milhão de toneladas de massa de recicláveis sólidos secos em 2020, o que representa cerca de 5,3% do total potencialmente recuperável.

Assim como em outras áreas do conhecimento, a acústica de ambientes também possui potencial para utilização dos conceitos de Economia Circular, por meio da utilização de materiais sustentáveis em seus projetos.

O fenômeno de absorção acústica ocorre através da dissipação, por atrito, das ondas sonoras na estrutura dos materiais absorvedores acústicos, normalmente fibrosos (lã de rocha, lã de vidro, lã de PET) ou porosos (espumas de poliuretano).

A matéria-prima utilizada na fabricação dos materiais fibrosos parte da extração de rochas e minerais para a lã de rocha, e de sílica e sódio para a lã de vidro, enquanto que as mantas de lã de PET são produzidas a partir da reciclagem de resíduos plásticos, apoiando na redução do impacto ambiental gerado por estes materiais.

Objetiva-se, com a realização deste trabalho, verificar a eficiência da lã de PET, e em adição a isso, verificar a viabilidade técnica da utilização de papelão extraído de caixas de ovos como absorvedor acústico, o que configura uma possibilidade de baixíssimo custo e impacto ambiental.

2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é verificar a viabilidade técnica e eficiência no uso de dois materiais reciclados – lã de PET e papelão extraído de caixas de ovos – como isolantes acústicos. Para isso serão realizados ensaios em tubo de impedância a fim de obter as curvas de absorção sonora destes materiais, e a partir disso, as curvas obtidas nos ensaios serão comparadas com as curvas das espumas de poliuretano.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo acústico arquitetônico foi pioneiramente desenvolvido pelo físico e professor estadunidense da Universidade de Harvard Wallace Clement Sabine. Ele foi o responsável por definir propriedades importantes, como o tempo de reverberação, o coeficiente de absorção e relacioná-los com a qualidade acústica e a geometria dos ambientes.

Sabine encarregou-se da reforma da sala de palestras do *Fogg Art Museum*, da Universidade de Harvard em 1895, na qual obteve uma redução do tempo de reverberação de aproximadamente 5 para 1 segundo. Após, em 1898, o físico participou do projeto do *Symphony Hall*, em Boston.

Os ensaios em tubo de impedância foram abordados pela primeira vez por Seybert e Ross, em 1977. Em seu artigo denominado “*Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique*” os autores demonstram em

experimentos a forma de determinar o coeficiente de absorção acústica a partir da relação entre os sinais dos microfones instalados no tubo de impedância.

Em 1988, Abom e Bodén publicam o artigo “*Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow*”, em que analisam uma forma de minimizar os erros de medição em tubo de impedância a partir do cálculo da faixa de frequência do som a ser emitido. Tal faixa depende do diâmetro do tubo e do distanciamento entre microfones.

Em 1998, a norma ISO 10534-2 *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method* estabeleceu os critérios para obtenção do coeficiente de absorção acústica de materiais a partir de ensaios em tubo de impedância.

Com a crescente preocupação ambiental, a análise da viabilidade de utilização de materiais sustentáveis para isolamento acústico vem sendo muito abordada nos últimos anos. É possível destacar a contribuição de Asdrubali, Schiavoni e Horoshenkov em seu artigo “*A review of sustainable materials for acoustic applications*” publicado em 2012, em que os autores analisam a eficiência acústica de materiais sustentáveis comparando-os com isolantes acústicos tradicionais.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

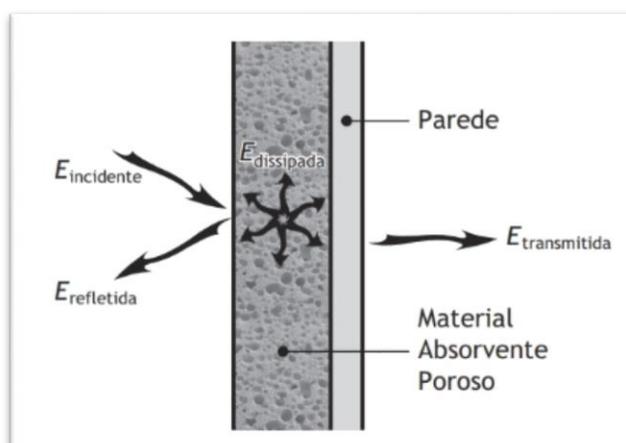
4.1 PROPRIEDADES SONORAS

O som pode ser definido como uma vibração que se propaga no meio elástico provocando sensações que o ouvido humano é capaz de detectar. Esta faixa de sons detectáveis varia na faixa de frequências de 20Hz a 20.000 Hz. Os sons com frequências abaixo de 20 Hz são chamados de infrassons, e os sons com frequência acima de 20.000 Hz são denominados ultrassons.

Quando o som emitido incide sobre uma superfície, sua energia é em parte refletida, dissipada ou transmitida. Além disso, a energia absorvida por determinada superfície considera a componente de energia transmitida e dissipada, portanto $E_{absorvida} = E_{transmitida} + E_{dissipada}$. A Figura 1 ilustra este comportamento.

Figura 1 – Balanço energético do som.

[Fonte: Bistafa (2018)]



O coeficiente de absorção sonora (α) é definido como a capacidade de uma superfície absorver som, enquanto a refletividade (ρ) é definida como a capacidade de uma superfície

refletir som. Tais propriedades podem ser descritas em termos matemáticos, conforme a Equação 1 e Equação 2, respectivamente.

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

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

Os valores para coeficientes de absorção sonora podem variar de zero a um, sendo $\alpha=0$ ($\rho=1$) para uma superfície puramente refletora, e $\alpha=1$ ($\rho=0$) para uma superfície puramente absorvedora. Portanto, para o tratamento acústico de ambientes é necessário utilizar materiais com o valor de α mais próximo possível de um. Há diversas propriedades que podem modificar o coeficiente de absorção sonora dos materiais, dentre estas propriedades destacam-se a espessura e a densidade.

O coeficiente de absorção sonora geralmente aumenta com o aumento da espessura e densidade dos materiais absorvedores, essas alterações possibilitam maior volume de contato entre a onda sonora emitida e o material, aumentando o atrito entre aquela e este e, conseqüentemente, a dissipação sonora.

4.2 MATERIAIS ABSORVEDORES

A dissipação da onda sonora na superfície de um material ocorre por meio de atrito entre as partículas de ar carregadas pela onda e a estrutura interna do material, fazendo com que a energia sonora produzida pelo som emitido se transforme em energia térmica. Portanto, é necessário que os materiais utilizados para absorção acústica permitam que a onda adentre em sua estrutura para então dissipá-la.

Os principais mecanismos de absorção sonora não existem nos materiais sólidos, pois estes não permitem que as partículas do ar interajam com sua estrutura. A absorção sonora é drasticamente reduzida nesses materiais, e passa então a depender das características superficiais de cada material. (BISTAFA, 2018, p. 249).

Na construção civil utilizam-se tipicamente materiais porosos, como as espumas de poliuretano, ou fibrosos, como a lã de vidro, a lã de rocha e a lã de PET para absorção acústica no tratamento de ambientes. Além deles, também é possível citar os ressonadores de cavidade, que se constituem de uma parede rígida com cavidades e espaços internos, como painéis perfurados de madeira; e as membranas ressonantes, como painéis leves e flexíveis instalados sobre a superfície do recinto.

A forma pela qual a energia sonora é dissipada depende do tipo de material utilizado como absorvedor. Nos porosos isso ocorre basicamente de três formas: por atrito entre o ar da onda sonora e o ar contido nos poros, por atrito do ar da onda sonora com o próprio corpo do material, e também através de reflexões internas entre os poros; nos materiais fibrosos a dissipação da energia sonora ocorre através de atrito entre as fibras que entram em vibração quando excitadas pela onda sonora incidente; nos ressonadores de cavidade o ar contido nas cavidades entra em vibração para determinada frequência de excitação, o que resulta na dissipação de energia e conseqüente absorção sonora; e nas membranas ressonantes o fenômeno ocorre através da excitação de sua estrutura pela onda sonora em sua frequência de ressonância, dissipando a energia sonora por meio de amortecimento interno do sistema.

Os materiais porosos e fibrosos possuem boa efetividade quando submetidos a ondas sonoras com média e alta frequência, tipicamente acima de 1000 Hz; os ressonadores de

cavidade atuam melhor em médias e baixas frequências, entre 200 e 1000 Hz e as membranas ressonantes são mais eficazes na faixa de baixas frequências, entre 75 e 200 Hz.

4.3 MÉTODO PARA MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

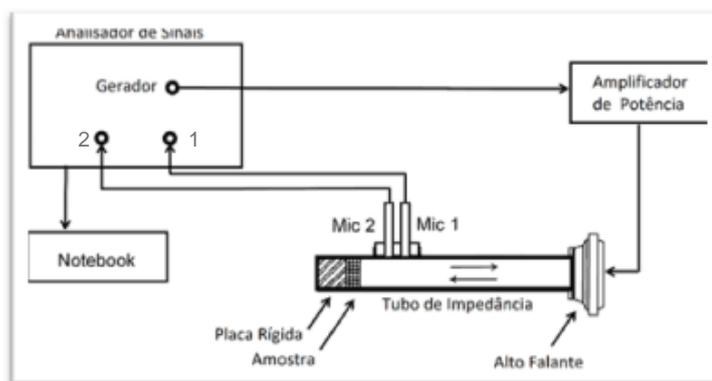
A caracterização acústica de materiais pode ser feita por meio de dois métodos tradicionais: a partir da câmara reverberante e a partir do tubo de impedância, este último sendo o escopo deste trabalho.

As câmaras reverberantes são espaços fechados com paredes rígidas e superfícies internas altamente reflexivas, com coeficiente de absorção acústica abaixo de 0,06. Estes espaços são projetados para que se reduzam ao máximo possível as ondas estacionárias, propiciando um campo reverberante com pressão sonora uniforme independentemente da posição da fonte sonora. O método para medição do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante é descrito pela norma ISO 354:2003 “*Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*”.

O método de caracterização acústica por tubo de impedância é normatizado pela ISO 10534-2:1998 “*Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes*”. Esta abordagem utiliza-se de um tubo cilíndrico de paredes rígidas e lisas com um alto-falante em uma das extremidades, a amostra do material absorvente na outra extremidade e dois microfones entre ambos. A Figura 2 ilustra esta configuração.

Segundo as definições da norma, os dois microfones fixados no tubo possuem um distanciamento s entre si, e a distância entre a amostra e o microfone 1 é denominada x_1 .

Figura 2 - Ilustração esquemática do tubo de impedância.



Para não ocorrer propagação de ondas não-planas no interior do tubo, a norma especifica a faixa de frequência para realização do ensaio, conforme a inequação abaixo:

$$f_u d < 0,58c_0 \quad (3)$$

Sendo f_u a frequência de corte em hertz, d o diâmetro do tubo em metros e c_0 a velocidade de propagação do som no interior do tubo em metros por segundo.

Outra limitação imposta pela norma é o espaçamento entre os microfones, este deve ser maior que 5% do comprimento de onda na menor frequência de interesse e menor que 45% do comprimento de onda na maior frequência de interesse. Estas recomendações evitam erros de medição como captação de pressões sonoras idênticas pelos dois microfones.

Em seu artigo “*Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow*”, publicado em 1988, Abom e Bodén definem a faixa de frequência para ensaios em tubo de impedância de modo a reduzir os erros de medição relacionando-a com o espaçamento entre os microfones, como mostra a inequação abaixo:

$$\frac{0,1c_0}{2s} < f < \frac{0,8c_0}{2s} \quad (4)$$

Para a obtenção das propriedades acústicas do material parte-se das pressões sonoras captadas pelos dois microfones e obtenção da função de transferência entre eles, conforme a Equação 5.

$$H(f) = \frac{P_2(f)}{P_1(f)} \quad (5)$$

Sendo $H(f)$ a função de transferência entre os microfones, $P_1(f)$ a pressão sonora captada pelo microfone 1 e $P_2(f)$ a pressão sonora captada pelo microfone 2 em função da frequência do som emitido.

Uma nova função de transferência corrigida, definida como $H^*(f)$, é obtida trocando os microfones de posição com o intuito de evitar erros devido a respostas diferentes entre os microfones. Assim, é possível chegar à função de transferência calibrada H_{12} , conforme a Equação 6.

$$H_{12}(f) = \frac{\sqrt{H(f)}}{\sqrt{H^*(f)}} \quad (6)$$

O coeficiente de absorção sonora é definido de acordo com a Equação 7.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (7)$$

Sendo α o coeficiente de absorção e R o coeficiente de reflexão. O valor de R pode ser determinado de acordo com a Equação 8.

$$R = \frac{H_{12}(f) - e^{-jk_0s}}{e^{jk_0s} - H_{12}(f)} e^{2k_0s} \quad (8)$$

Em que k_0 é o número de onda complexo no ar, definido de acordo com a Equação 9 abaixo.

$$k_0 = \left(\frac{\omega}{c_0}\right) - j0,0194 \left(\frac{\sqrt{f}}{c_0 d}\right) \quad (9)$$

Sendo $\omega = 2\pi f$ a frequência angular. Fisicamente, o número de onda pode ser definido como o número de oscilações por unidade de distância, enquanto a frequência representa o número de oscilações da onda sonora por unidade de tempo.

5. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho consiste na seleção de amostras de quatro materiais diferentes (lã de PET, dois tipos de espuma de poliuretano e papelão extraído de caixas de ovos) e ensaio em tubo de impedância para obtenção das curvas de absorção sonora destas amostras, comparando-as após os testes.

Os testes em tubo de impedância seguem a norma ISO10534-2 - *Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes*. O ensaio consiste em fixar a amostra selecionada em uma extremidade enquanto um ruído de banda larga é emitido por alto-falante na outra extremidade, tendo dois microfones entre a fonte do ruído e a amostra para captação da pressão sonora. A partir dos valores obtidos para as pressões sonoras nos microfones é possível chegar ao valor do coeficiente de absorção sonora da amostra considerando os cálculos previstos na norma.

Os equipamentos utilizados durante os testes, todos de propriedade do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Listagem de equipamentos utilizados.

Equipamento	Fabricante	Tipo	Nº de série
Tubo de impedância	-	-	-
Microfone capacitivo ½"	Brüel & Kjær	4189	2978272
Microfone capacitivo ½"	Brüel & Kjær	4189	2978273
Analisador de sinais	Brüel & Kjær	3160-B-042	-
Amplificador de potência	Brüel & Kjær	2718	-

As imagens dos microfones, analisador de sinais e amplificador de potência listados na Tabela 1 podem ser vistas na seção de Anexos.

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

6.1 DETERMINAÇÃO DA FAIXA DE FREQUÊNCIA

Os ensaios descritos neste trabalho foram realizados no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O tubo de impedância utilizado no experimento possui 26 mm de diâmetro d , espaço entre microfones s de 25 mm e distância x_1 entre o microfone 1 e a amostra de 44 mm.

A Equação 10 nos fornece o valor para a velocidade do som no interior do tubo de impedância.

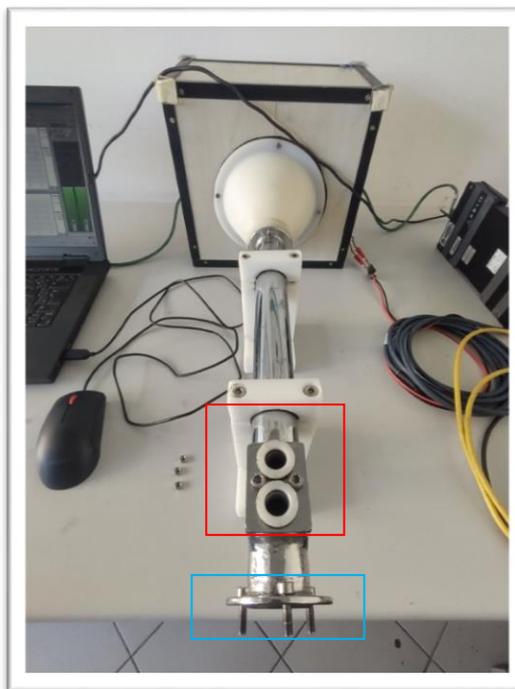
$$c_0 = 331,45 \sqrt{\frac{T}{T_0}} = 343,4 \text{ m/s} \quad (10)$$

Onde $T = 293$ é a temperatura em Kelvin no interior do tubo e $T_0 = 273,15 \text{ K}$. Substituindo este valor na Equação 3 pode-se chegar a uma frequência de corte de 7656 Hz, segundo a norma ISO10534-2 - *Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes*.

Utilizando a inequação de Abom e Bodén, descrita na Equação 4 é possível obter um limite inferior de frequência de 687 Hz e um limite superior de 5491 Hz.

Na Figura 3 está ilustrado o tubo de impedância utilizado nos testes, onde, em vermelho estão os locais de fixação dos microfones e em azul o local de fixação das amostras. O tubo é feito de Aço 1020 com tratamento na superfície à base de Cromo, e a fonte sonora é enclausurada e preenchida com material acústico na cavidade

Figura 3 - Tubo de impedância.



6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram utilizadas amostras de quatro materiais diferentes para a realização dos testes. A Tabela 2 mostra um resumo de suas características e quantitativos.

Tabela 2 – Propriedades das amostras utilizadas.

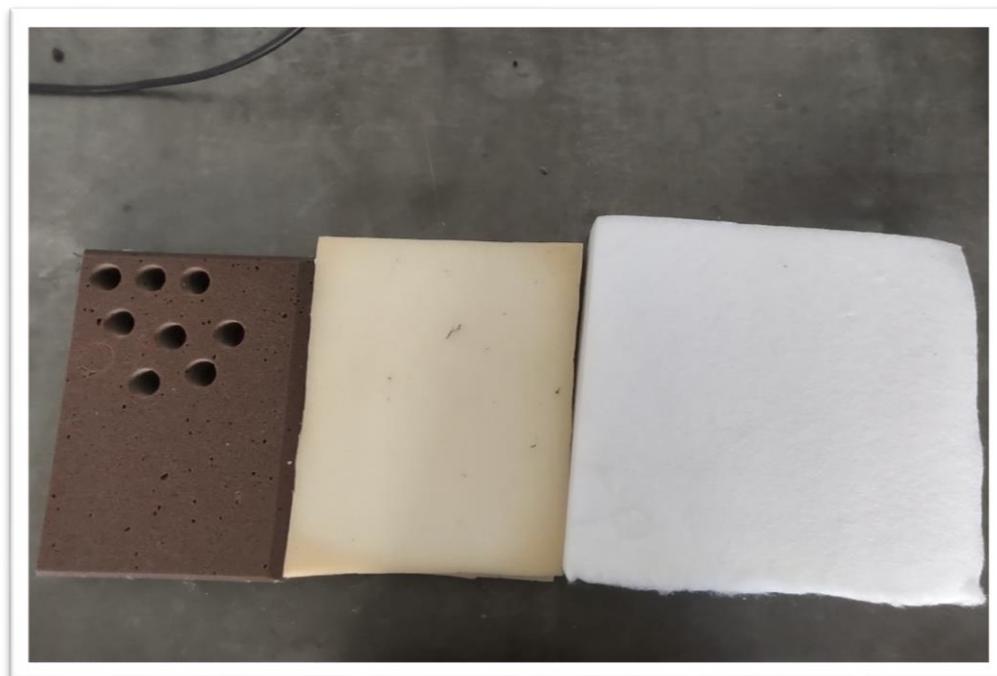
Material	Nº de amostras	Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)
Espuma 1	5	11	30
Espuma 2	5	23	10
Lã de PET	5	50	10
Papelão de caixas de ovos	5	237*	2*

A Espuma 1 é um material de poliuretano de boa qualidade, largamente utilizado para o tratamento acústico de ambientes, enquanto a Espuma 2 é um material de poliuretano de menor qualidade, porém mais acessível economicamente.

A lã de PET é produzida a partir de fibras leves de poliéster recicladas de garrafas PET, que passam por processo de compactação a baixa temperatura e pressão.

Tanto a lã de PET quanto às espumas de poliuretano foram adquiridas em lojas de construção de Porto Alegre/RS. As placas dos materiais absorvedores podem ser vistas na Figura 4, da esquerda para a direita, Espuma 1, Espuma 2 e Lã de PET.

Figura 4 – Placas dos absorvedores acústicos utilizados.



Ressalta-se que as amostras de papelão extraído de caixas de ovos serão sobrepostas em cinco camadas para alcançar uma espessura total de 10 mm e possibilitar uma análise comparativa melhor com os demais materiais.

A média de massa das amostras foi obtida a partir de medição em balança analítica Shimadzu modelo AY220, com legibilidade de 0,0001 g, e para o cálculo do volume foi utilizado 26 mm como diâmetro e 2 mm como espessura.

Chegou-se ao valor médio de 0,23 g para a massa, e 981,25mm³ de volume e, portanto, ao valor de 237,86 kg/m³ para a densidade do material. A Figura 5 mostra a medição de massa de uma das amostras.

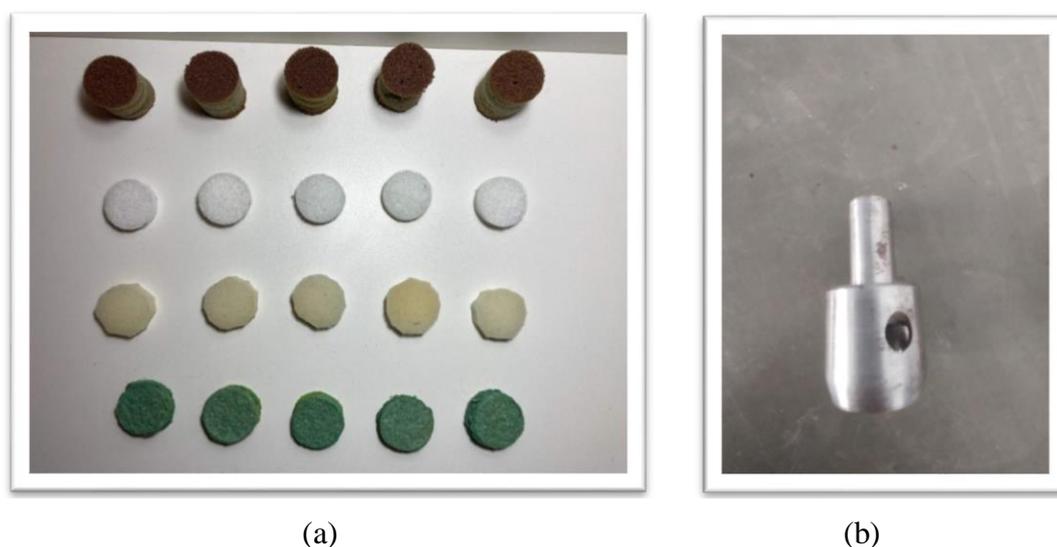
Figura 5 - Pesagem de amostra em balança analítica.



Para o corte das amostras dos materiais utilizou-se um corta-amostra presente no laboratório, que possui diâmetro idêntico ao do tubo de impedância (26 mm). Os cortes realizados devem ser feitos com cuidado para manter o diâmetro das amostras o mais próximo possível entre si.

As amostras após o corte e o corta-amostras podem ser visualizados na Figura 6(a) e Figura 6(b), respectivamente.

Figura 6 – (a) Amostras após o corte; (b) Corta-amostras utilizado.



As amostras representadas na Figura 6(a) são, de cima para baixo, Espuma 1, Lã de PET, Espuma 2 e Papelão extraído de caixas de ovos.

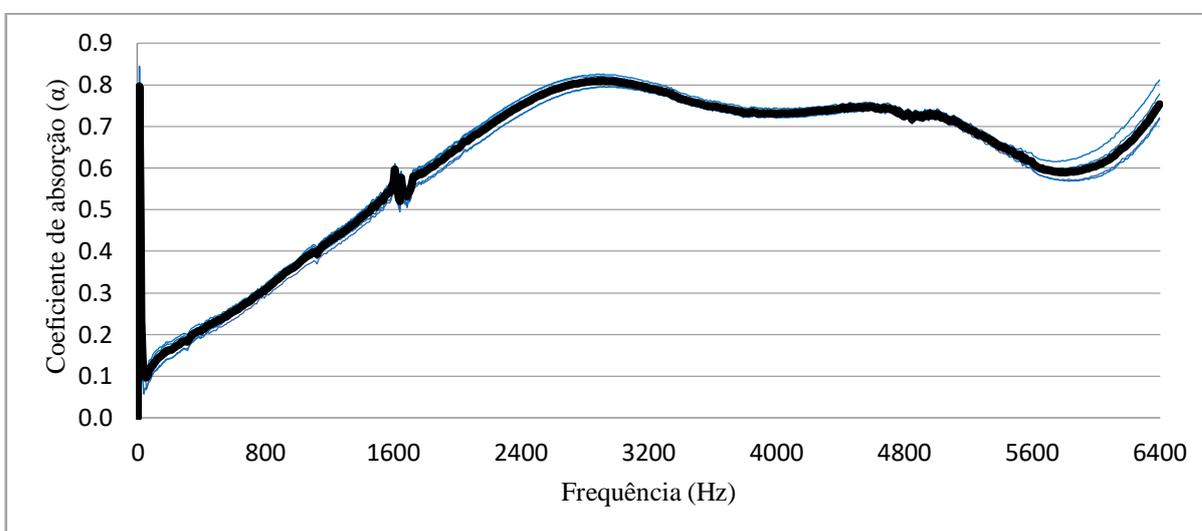
7. RESULTADOS

Os resultados aqui descritos são obtidos a partir da medição da pressão sonora nos microfones e posterior cálculo das variáveis expostas na seção 4.3 por meio do *software* PULSE.

As curvas para os coeficientes de absorção acústica confirmaram o esperado para o caso das amostras da Espuma 1, devido à melhor qualidade e maior espessura. Seu coeficiente de absorção médio ultrapassou 0,80 para frequências próximas a 3000 Hz e permaneceu acima de 0,70 até frequências da ordem de 5000 Hz, o que ratifica o exposto acima sobre a maior eficácia de materiais porosos para uso em médias e altas frequências. Além disso, é possível observar uma tendência de alta no coeficiente de absorção a partir da frequência de 5700 Hz.

A Figura 7 mostra as curvas para as cinco amostras da Espuma 1 e sua média em destaque.

Figura 7 – Resultados obtidos para a Espuma 1.

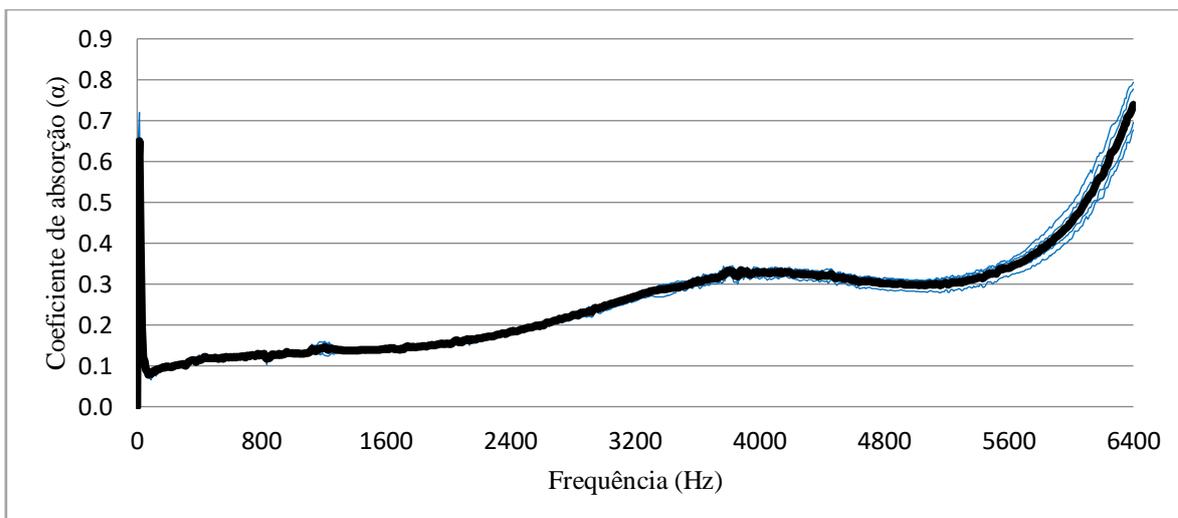


A Espuma 2, assim como a anterior, também possui maior coeficiente de absorção para médias e altas frequências, porém, com valores muito menores. A curva do material apresenta lenta ascensão até um coeficiente de 0,33 na frequência de 3800 Hz, e também é possível observar uma tendência de alta no coeficiente de absorção a partir da incidência de ondas na frequência de 5000 Hz, chegando a valores da ordem de 0,70.

Ressalta-se que apesar da Espuma 2 possuir maior densidade em relação à Espuma 1, ela possui coeficiente de absorção sonora inferior em toda a faixa de frequência do ensaio. Isso se deve principalmente ao fato de sua espessura ser três vezes menor que a da Espuma 1, além disso, a Espuma 1 possui maior qualidade, que está diretamente relacionada à porosidade do material. É possível verificar na Figura A5, na seção de anexos, uma imagem aproximada das duas amostras. Verifica-se o maior número de poros da Espuma 1, o que lhe possibilita dissipar a energia sonora com maior eficiência.

A Figura 8 ilustra o comportamento das cinco amostras da Espuma 2 e sua média.

Figura 8 – Resultados obtidos para a Espuma 2.



O ensaio realizado na Lã de PET proporcionou resultados muito similares aos obtidos na Espuma 2, porém, a partir de 5500 Hz a Espuma 2 exibe melhores resultados, chegando a uma diferença de 0,1 no coeficiente de absorção para frequências em torno de 6000 Hz.

Observa-se uma lenta elevação até o valor de 0,35 para frequência de 4000 Hz, e assim como as amostras dos materiais porosos, apresentou uma tendência de alta a partir de 5000 Hz, chegando a um coeficiente de absorção de 0,60.

A Figura 9 apresenta os resultados para as amostras da Lã de PET e a Figura 10 mostra um comparativo entre as curvas médias deste material e da Espuma 2, ambas com 10 mm de espessura.

Figura 9 – Resultados obtidos para Lã de PET.

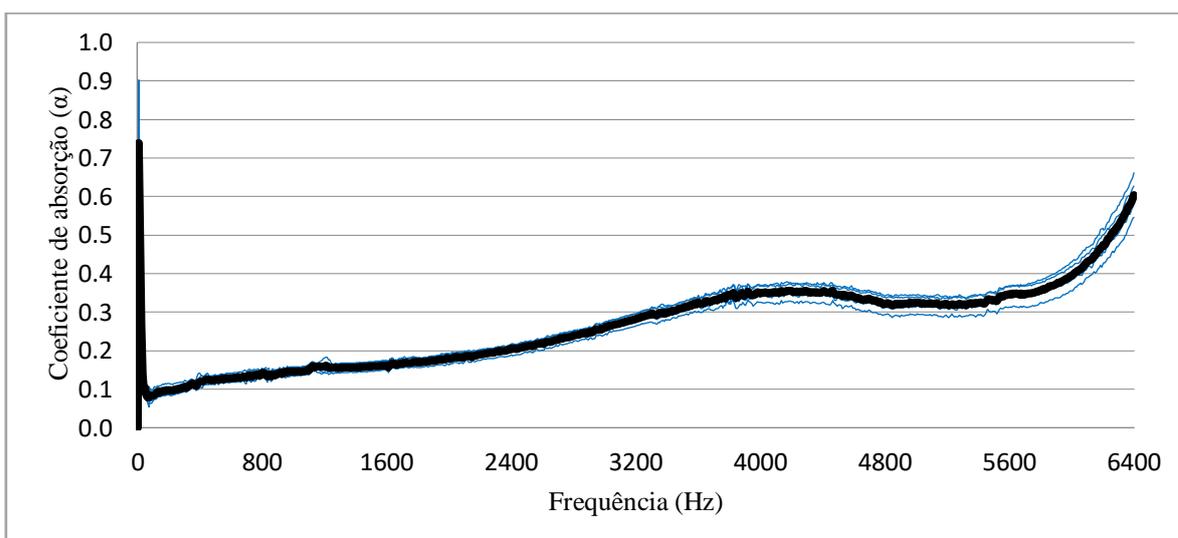
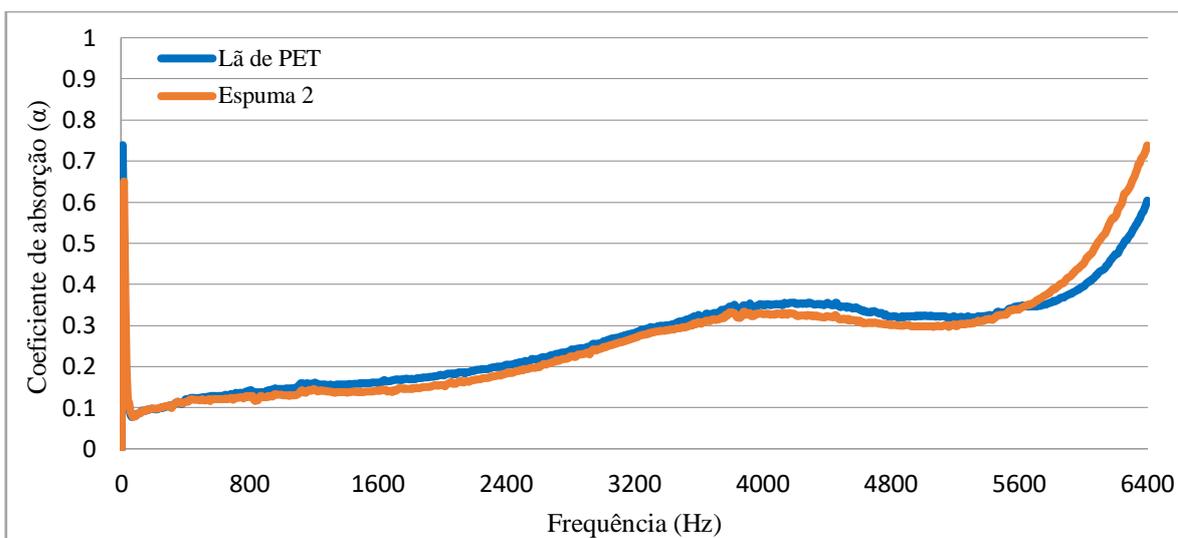


Figura 10 – Comparativo entre Lã de PET e Espuma 2.



As amostras de papelão extraído de caixas de ovos, como esperado, apresentaram grande divergência entre si para os valores do coeficiente de absorção. Isso ocorre devido à heterogeneidade de sua composição e ao fato de terem sido sobrepostas para a realização do ensaio – o que gera pequenos espaços desiguais que são ocupados pelo ar.

Observando os valores médios do coeficiente de absorção para o papelão extraído de caixas de ovos, verifica-se que a curva média de absorção acústica do material supera os resultados para a Espuma 2 e Lã de PET na faixa de frequência que se estende de 900 a 5700 Hz. Além disso, o material apresenta valores em torno de 0,4 para o intervalo entre 2700 Hz e 5500 Hz. Estes resultados podem estar atrelados à alta densidade do material, assim como à sua disposição em camadas.

A Figura 11 mostra as curvas para as amostras de papelão extraído de caixas de ovos e a Figura 12 traz um comparativo entre Espuma 2, Lã de PET e Papelão extraído de caixas de ovos.

Figura 11 – Resultados obtidos para Papelão extraído de caixas de ovos.

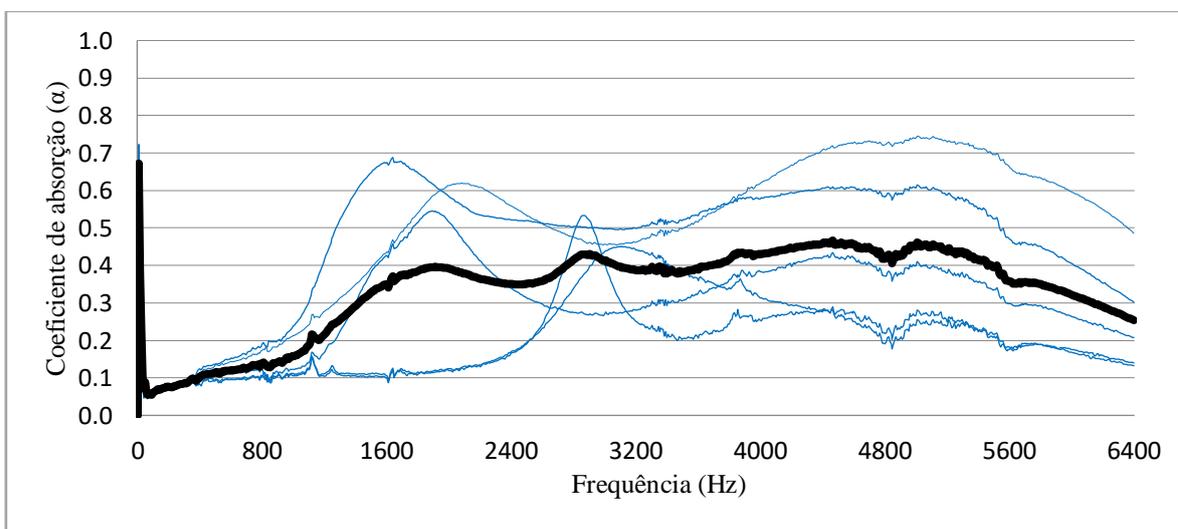
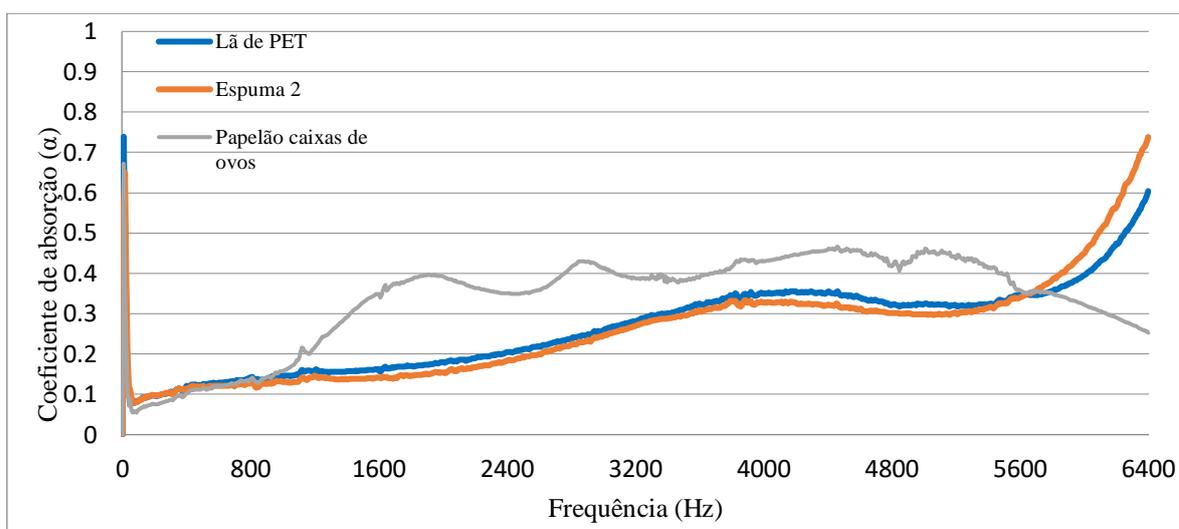


Figura 12 – Comparativo entre Lã de PET, Espuma 2 e Papelão extraído de caixas de ovos.



8. CONCLUSÕES

Devido à sua maior espessura, os resultados da Espuma 1 foram omitidos da Figura 12 a fim de possibilitar a comparação apenas entre os materiais com 10 mm de espessura.

A análise comparativa entre as amostras demonstra que a lã de PET possui potencial para estabelecer-se como um bom material para isolamento acústico, já que as amostras de pequena espessura analisadas apresentaram resultados similares a uma espuma de poliuretano comercial de média qualidade. Além disso, trata-se de material de origem reciclada, o que contribui para o fortalecimento de medidas ambientalmente mais sustentáveis. Para futuros trabalhos seria interessante analisar amostras de lã de PET de maior espessura, com camada de pintura – fatores que influenciam o desempenho dos materiais absorvedores acústicos. A Figura A4(a) e a Figura A4(b) da seção de anexos ilustram o efeito desses fatores para o coeficiente de absorção acústica.

Apesar das divergências entre as amostras, os resultados obtidos para o papelão extraído de caixas de ovos foram surpreendentes, uma vez que a curva média de absorção acústica superou as curvas da lã de PET e da Espuma 2 para uma ampla faixa de frequências. Estes resultados demonstram o potencial para o material tornar-se uma opção viável para ambientes que necessitam de isolamento acústico, mas que não possuem alta capacidade de investimento. Porém deve-se levar em consideração a baixa durabilidade do material.

Em função da divergência nos resultados entre as amostras, para trabalhos futuros seria importante aumentar o número de amostras para obter valores mais representativos, reduzindo o erro amostral.

Salienta-se que os ensaios realizados em tubos de impedância consideraram apenas ondas com incidência normal às amostras, portanto, para estudos futuros seria importante a realização de testes em câmara reverberante para analisar os resultados dos materiais frente a ondas sonoras provenientes de diversas direções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASDRUBALI, F.; SCHIAVONI, S.; HOROSHENKOV, K.V. **A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications**, Building Acoustics, 2012.

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

BODÉN, H.; ABOM, M. **Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow**, The Journal of the Acoustical Society of America, 1988.

GOMES, C. V. S. **Comportamento acústico de materiais absorvedores em multicamadas**, Tese de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

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.; TAMAGNA, A. **Tópicos de Acústica Aplicada-Notas de Aula de Eng03015-Acústica Aplicada**, Brasil, 1ª edição, 2007.

OLIVEIRA, T.; MAREZE, P.H.; PEREIRA, M.; AGUIRRE, S.; FONSECA, W. D. A.; BRANDÃO, E.; PIRK, R.. **Sound absorption coefficient measurement based on the Transfer Function Method specified by the standard ISO 10534-2 using low-cost alternatives**, 22nd International Congress on Acoustics, Buenos Aires, 2016.

RAÍNHO, L. P. T. **A utilização de materiais reciclados na construção para melhoria do desempenho térmico e acústico**, Tese de mestrado, Universidade de Coimbra, 2013.

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

ANEXOS

Figura A1 – Amplificador de potência.



Figura A2 – Analisador de sinais.



Figura A3 – Microfones capacitivos.



Figura A4 – (a) Variação da espessura; (b) Efeito da aplicação de tinta.
 [Fonte: Bistafa (2018)]

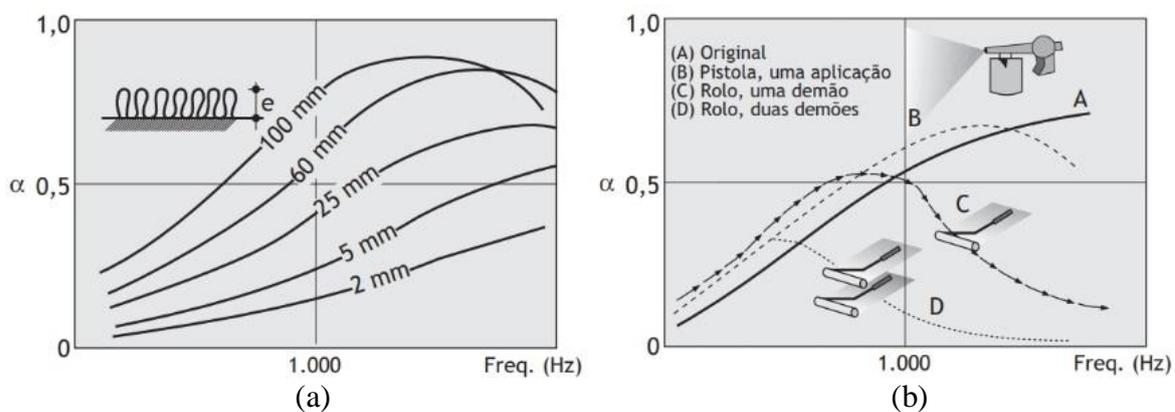


Figura A5 – Estrutura física da Espuma 1 (à esquerda) e Espuma 2 (à direita).

