



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE
POLIURETANO DE MAMONA EM TUBO
DE IMPEDÂNCIA**

TIAGO GONÇALVES

JOINVILLE, SC
2018

TIAGO GONÇALVES

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE POLIURETANO DE MAMONA EM TUBO DE
IMPEDÂNCIA**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

JOINVILLE, SC

2018

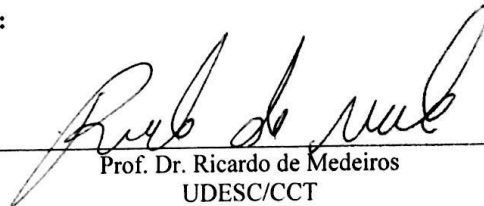
TIAGO GONÇALVES

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE POLIURETANO DE MAMONA EM TUBO DE IMPEDÂNCIA


Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC0001) do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

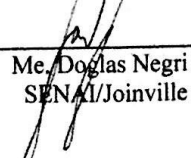
Banca Examinadora:

Orientador:


Prof. Dr. Ricardo de Medeiros
UDESC/CCT

Membros:


Prof. Dr. Sergio Junichi Idehara
UFSC/Joinville


Me. Douglas Negri
SENAI/Joinville

Joinville, 29 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Claudio e Adriana, por me darem oportunidade e apoio para poder me empenhar 100% aos estudos e conseguir ingressar em uma faculdade de renome como a UDESC, acredito que sem eles nada disso estaria acontecendo agora.

Gostaria também de agradecer a minha namorada, Eduarda, quem me deu apoio e motivação durante o TCC, nas noites em que precisei focar e escrever, o apoio dela foi determinante para a entrega do trabalho no prazo.

Agradeço também ao meu orientador, Ricardo, sem ele o estudo não teria sido concluído, me ajudou muito nessa longa caminhada de experimentos e revisões, acredito que a escolha do orientador foi essencial para a qualidade do trabalho.

RESUMO

A poluição sonora refere-se ao efeito danoso provocado por sons em determinado volume que superem os níveis considerados normais para os seres humanos, sendo este assunto muito discutido nos dias atuais. A poluição sonora atrapalha diferentes atividades humanas, independentemente dos níveis sonoros serem potencialmente agressores aos ouvidos, a poluição sonora pode, em alguns indivíduos, causar estresse, e com isto, interferir na comunicação oral, perturbar o descanso e o relaxamento, impedir a concentração e aprendizagem. Com objetivo de minimizar este problema, recorreremos ao uso de isolamento acústico dentro de moradias ou estabelecimentos, que produzem níveis elevados de ruídos. Por outro lado, busca-se utilizar materiais visando a sustentabilidade, com isso, surge o poliuretano a base de mamona como um material biodegradável, diminuindo assim os efeitos danosos causados no meio ambiente. Assim, este trabalho consiste no estudo da utilização de poliuretano de óleo de mamona, como material para o isolamento acústico. Para isso, analisou-se os efeitos da adição de alumina tri-hidratada como retardante de chama. Sendo este um tipo de hidróxido de alumínio, desenvolvido especificamente para ser incorporado em sistemas poliméricos como retardante de chama e supressor de fumaça, tornando-se assim um material mais seguro para ser utilizado em ambientes que requerem tal requisito. Para isso, analisou-se a perda de transmissão (TL), que em geral, descreve a diminuição acumulada na intensidade de uma energia de onda quando uma onda se propaga para fora de uma fonte, ou quando se propaga através de uma determinada área ou através de um certo tipo de estrutura. Utilizou-se um tubo de impedância para análise da perda de transmissão para a faixa de 200 Hz até 6400 Hz. Conclui-se que a adição da alumina não acarreta grandes alterações nas suas propriedades, tornando-se uma boa alternativa para utilização como isolamento acústico.

Palavras-Chave: Tubo de impedância, poliuretano com base de mamona, caracterização acústica, perda de transmissão.

ABSTRACT

Sound pollution refers to the harmful effect caused by sounds in a certain volume that exceeds levels considered normal for humans, and this subject is much discussed today. Sound pollution disrupts different human activities, regardless of the sound levels being potentially aggressive to the ears, noise pollution can in some individuals cause stress, and with this, interfere in oral communication, disturb rest and relaxation, prevent concentration and learning. In order to minimize this problem, we use acoustic insulation in homes or establishments, which produce high levels of noise. On the other hand, it is sought to use materials aiming at sustainability, with this, the polyurethane comes from castor bean as a biodegradable material, thus reducing the effects caused on the environment. Therefore, this work consists of the study of the use of castor oil polyurethane as material for acoustic insulation. Thus, the effects of adding alumina trihydrate as flame retardant were analyzed. This being a type of aluminum hydroxide, specifically developed to be incorporated into polymeric systems as a flame retardant and smoke suppressor, thus becoming a safer material for use. For this, we analyzed transmission loss (TL), which generally describes the cumulative decrease in the intensity of a wave energy when a wave propagates out of a source, or when it propagates through a certain area or through a certain type of structure. An impedance tube was used to analyze the loss of transmission in the range of 200 Hz to 6400 Hz. Thus, it was concluded that the addition of alumina does not entail major changes in its properties, making it a good alternative for use as soundproofing.

Keywords: Impedance tube, castor-based polyurethane, acoustic characterization, transmission loss.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Reação de um material sob a incidência sonora	21
Figura 2 – Tubo de impedância com 2 microfones	23
Figura 3 – Tubo de impedância com 4 microfones	25
Figura 4 – Pressões e velocidades em determinados pontos da amostra	26
Figura 5 - Perda de Transmissão testada em um tubo de impedância.	28
Figura 6 - Resultados obtidos por Yasmin, material: argamassa com borracha.	28
Figura 7 – Fluxograma da metodologia utilizada	29
Figura 8 - Medições no aparato experimental.....	29
Figura 9 – Setup experimental para análise de perda de transmissão	30
Figura 10 – Tubo de impedância para amostras menores (29mm)	31
Figura 11 – Tubo de impedância para amostras maiores (100mm)	31
Figura 12 – Microfones para os testes.....	31
Figura 13 – Amplificador de potência Type 2732	32
Figura 14 – Módulo de aquisição B&K Type 3160-A-042	32
Figura 15 – Amostras com diâmetro de 29mm (a) vista superior e (b) análise da espessura	33
Figura 16 – Amostras com diâmetro de 100mm (a) vista superior e (b) análise da espessura	34
Figura 17 - Resultados amostra PU – 10% de 2017.....	35
Figura 18 – PU Puro - 29mm	36
Figura 19 – PU com adição de 10% Alumina – 29mm.....	36
Figura 20 – PU com adição de 20% Alumina – 29mm.....	37
Figura 21 – PU com adição de 30% Alumina – 29mm.....	37
Figura 22 – PU com adição de 40% Alumina – 29mm.....	38
Figura 23 – PU com adição de 50% Alumina - 29mm	38
Figura 24 – Resultados para as diferentes frações de alumina das amostras de diâmetro igual 29 mm	39
Figura 25 – Resultados para as diferentes frações de alumina das amostras de diâmetro igual 100 mm	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de materiais porosos	22
Tabela 2 – Matriz de amostras experimentais	33
Tabela 3 - Resultados EVA com base nos resultados da empresa Kolano e Saha Engineers	40
Tabela 4 - Demonstração dos resultados das amostras	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	POLIURETANOS	19
2.2	CONTROLE DE RUÍDO	20
2.3	ABSORÇÃO SONORA	21
2.4	TUBO DE IMPEDÂNCIA	23
2.4.1	Absorção	23
2.4.2	Transmissibilidade.....	25
2.5	MATERIAIS TESTADOS EM UM TUBO DE IMPEDÂNCIA.....	27
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	MATERIAIS.....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1	CARACTERIZAÇÃO	40
5	CONCLUSÕES.....	43
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O homem moderno tem hoje sua atenção voltada para as questões ambientais. Na preocupação com a preservação do meio ambiente, nos vemos em um cenário de busca constante por tecnologia limpa, com a intenção de minimizar os prejuízos que nossa existência acarreta ao planeta. Por outro lado, com o desenvolvimento das cidades, aumenta o número de casos de indivíduos com stress, conhecida como a doença do século XXI. Neste cenário a qualidade e conforto proporcionada pelas moradias tem um papel preponderante pois contribui para a satisfação e qualidade de vida dos seus ocupantes.

Por outro lado, uma grande preocupação dos dias de hoje é a intensidade de poluentes, lançados na superfície terrestre. Os polímeros sintéticos, que foram responsáveis por muitos avanços que temos hoje como os materiais plásticos, e a infinidade de itens que estão presentes no nosso cotidiano, também são responsáveis por grandes problemas com o meio ambiente. Muitos polímeros não são recicláveis e os derivados de petróleo não sofrem biodegradação, que por sua vez causam problemas imensuráveis como enchentes, entre outros ambientais. Visando estes problemas o material utilizado neste estudo consiste em uma modificação no poliuretano usando como base o óleo de mamona, tornando-o assim em um material biodegradável.

Materiais porosos são amplamente utilizados em diversas aplicações para controle de ruído, a caracterização vibro acústica desses materiais é fundamental na aplicação de recursos em controle de ruído, o método utilizado será um tubo de impedância atrelado à um software computacional, diminuindo assim as incertezas de cálculo do sistema. Com a evolução de sistemas computacionais fez com que a precisão destes sistemas aumentasse e com a necessidade de diminuição do tempo de trabalho e custo, fez com que engenheiros substituíssem métodos tradicionais por métodos computacionais. Para isso, o tubo de impedância pode realizar a caracterização inversa do material, emitindo frequências que ultrapassem a amostra e realizando a aquisição dos dados, medindo então, a capacidade do material de refletir, absorver ou transmitir o ruído.

Aliado a isto, uma motivação bastante relevante para o estudo a seguir, foi o evento que aconteceu em 2013 na boate Kiss, onde o fogo tomou conta do local tornando várias pessoas vítimas devido as chamas e a fumaça. O fato aconteceu, pois, os materiais utilizados no isolamento acústico são altamente inflamáveis e, após o início do fogo dificilmente conseguem

conte-lo. Busca-se então estudar os efeitos da aplicação da alumina tri-hidratada, sendo este material retardante de chamas, durante a produção de estruturas de poliuretano de óleo de mamona, nas propriedades acústicas desse material.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo do material será estudar os efeitos da alumina tri-hidratada, em estruturas de poliuretano de óleo de mamona, visando não somente ao isolamento acústico, mas também a retardação das chamas nestas estruturas. Além disso, podemos destacar os seguintes objetivos específicos:

- Realizar revisão dos conceitos relacionados à caracterização de matérias através da utilização de um tubo de impedância.
- Modelar o sistema de testes e realizar a utilização do tubo de impedância conforme estudado anteriormente.
- Comparar o PU, poliuretano expandido com base em óleo de mamona, com o EVA, espuma sintética utilizada para barreira acústica, para analisar se as propriedades acústicas do PU podem ser aplicadas conforme as normas e leis acústicas.
- Comparar resultados experimentais com resultados encontrados na literatura, para assim encontrar a precisão do material de estudo e a aplicabilidade do material.
- Analisar as propriedades acústicas do material com a degradação ao longo do tempo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é planejada de tal forma que o leitor possa ser situado aos conceitos experimentais aplicados, a fim de determinar a caracterização e aplicabilidade do material estudado. Assim, o trabalho é estruturado da seguinte forma:

- **Primeiro Capítulo** – Introdução do trabalho, onde foi apresentada a ideia e motivação por trás do estudo realizado.
- **Segundo Capítulo** – Fundamentação teórica, onde realiza-se a revisão bibliográfica dos principais conceitos do material e procedimento de análise da amostra, para demonstrar ao leitor alguns trabalhos já realizados por outros autores acerca deste tema.

- **Terceiro Capítulo** – Traz a metodologia utilizada no material, demonstrando passo a passo de todos os métodos e materiais utilizados na parte experimental.
- **Quarto Capítulo** – Demonstra os resultados obtidos e a comparação entre o que foi demonstrado teoricamente e o que foi obtido experimentalmente.
- **Quinto Capítulo** – A conclusão do trabalho, trazendo então a caracterização do material estudado e a possível aplicabilidade do mesmo, mostrando possíveis trabalhos futuros para a melhoria do método aplicado.
- **Sexto Capítulo** – Por fim é apresentado as referências utilizadas neste estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 POLIURETANOS

Em 1848 o químico francês Charles Adolphe Würtz descobriu que os grupos isocianatos reagem com grupos de hidroxilas primárias dando origem a grupos uretanos (MARQUES; MARTINS, 2009). Por quase um século essas reações se limitaram a simples experimentos de laboratório, até que em 1937 o alemão Dr. Otto Bayer e colaboradores levaram o poliuretano à escala industrial. Atualmente o poliuretano tem sido usado em diversas áreas da indústria devido à possibilidade de obter esse polímero com uma grande diversidade de propriedades físicas, sendo possível obter infinitas variações de características pela combinação de matéria prima de diferentes propriedades químicas.

Embora as propriedades do poliuretano possam ser determinadas principalmente pela escolha do polioliol, o diisocianato também exerce alguma influência. A taxa de cura é influenciada pela reatividade do grupo funcional. As propriedades mecânicas são influenciadas pela funcionalidade e pela forma da molécula. Surgem poliuretanos mais macios, elásticos e flexíveis quando segmentos de polietilenoglicol disfuncionais lineares, normalmente chamados de polióis poliéter, são usados nas ligações uretânicas. Esta estratégia é usada para se fazer fibras elastoméricas similares ao spandex, comercializado pela DuPont, empresa americana segunda maior empresa química do mundo, com o nome Lycra e peças de borracha macia, assim como espuma de borracha (MARQUES; MARTINS, 2009).

Produtos mais rígidos surgem com o uso de polióis poli funcionais, já que estes criam uma estrutura tridimensional emaranhada. Pode-se obter uma espuma ainda mais rígida com o uso de catalisadores de trimerização, que criam estruturas cíclicas no interior da matriz da espuma. São designadas de espumas de poliisocianurato, e são desejáveis nos produtos de espuma rígida usados na construção civil.

A espuma de poliuretano (inclusive a espuma de borracha) é geralmente feita com a adição de pequenas quantidades de materiais voláteis, chamados de agentes de sopro, à mistura reacional. Tais materiais podem ser substâncias químicas voláteis e simples, como a acetona ou o cloreto de metileno, ou fluoro carbonetos mais sofisticados, que conferem características importantes de desempenho, como o isolamento térmico e acústico.

O poliuretano derivado do óleo de mamona veio em meados de 1984 quando o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebrás enfrentava problemas com a resina que protegia os

cabos telefônicos da unidade. A Empresa então decidiu procurar o Instituto de Química da Universidade de São Paulo, USP. A equipe de pesquisadores da USP, liderados pelo professor Gilberto Orivaldo Chierice, desenvolveu um polímero derivado do óleo de mamona para substituir a resina utilizada pela empresa, o produto se mostrou eficiente aos fins a que foi destinado. Tornando assim o plástico, material muito prejudicial ao meio ambiente, biodegradável diminuindo assim sua agressão à natureza (CARDOSO; BALABAN, 2013).

Segundo Cangemi (2006), a American Society for Testing and Material (ASTM), define plástico biodegradável como sendo aquele que sofre uma significativa mudança em sua estrutura química sob condições ambientes específicas, resultando em perda de algumas propriedades, cujas alterações podem ser mensuradas por métodos padrões apropriados a plásticos e a aplicações em periódicos de tempo que determinem sua classificação. O poliuretano derivado do óleo da mamona é um polímero biodegradável. Testes feitos com espumas de PU's comprovaram a boa biodegradação desse material na presença de micro organismos oriundos de agentes biológicos degradantes de gorduras, por ser um material preparado a partir de óleo vegetal, seu processo de biodegradação se semelha à degradação de dessas. (CANGEMI, 2006).

2.2 CONTROLE DE RUÍDO

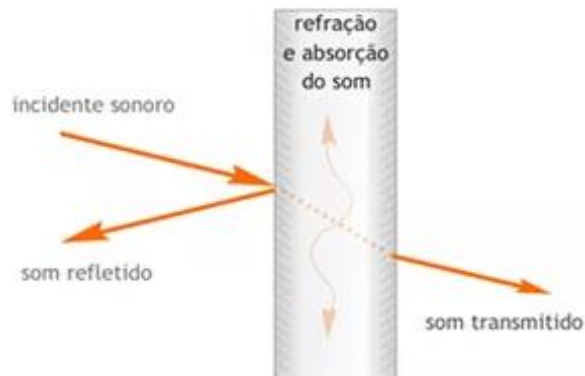
Controle de ruído é o processo de obtenção de um ambiente acusticamente aceitável controlando a fonte, o caminho, o receptor, ou ainda todos os três. Assim, apresenta-se uma abordagem clássica em acústica para controle de ruído, onde um mapa de ruído é elaborado, identificando as fontes e os caminhos pelos quais o ruído pode ser conduzido até o receptor. (SILVA, 2018).

Para este trabalho a técnica abordada será o controle de ruído conhecido como controle passivo, onde são realizadas modificações no ambiente e não na emissão do sinal, tornando assim a o controle passivo mais econômico e fácil de implementar, porém o desempenho é limitado para média e alta frequência. Controles passivos utilizam os seguintes tipos: absorvedores e barreiras, para controle de ruído aéreo, isoladores e amortecedores para controle de ruído estrutural. Absorvedores sonoros diminuem o ruído por dissipação de energia sonora, absorvendo o som, já barreiras sonoras controlam o ruído sem dissipação, ou seja, refletem a incidência sonora.

2.3 ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é definida pela quantidade de energia acústica dissipada em forma de som pelo material (PASSERI, 2009). O coeficiente sonoro de absorção, demonstrado por Wallace Sabine define a unidade *Sabine*. Um *Sabine* é a fração de potência acústica absorvida por um metro quadrado de janela aberta (SABINE, 1869). Em unidades SI, o coeficiente é demonstrado em metros inversos e representado pela letra grega α . A Figura 1 ilustra como um material acústico reage sob a incidência de ondas sonora.

Figura 1 – Reação de um material sob a incidência sonora



Fonte: Melhor Acústica, 2009.

Observa-se que parte da energia sonora incidida sobre a face do material é refletida e o restante penetra o material, podendo ser absorvida ou transmitida através dele. O coeficiente de absorção é a soma do percentual de energia não refletida (MICHALSKI, 2015). Como demonstrado na Figura 1, o coeficiente de absorção é simplesmente o resultado da divisão entre a soma da energia dissipada e transmitida pela energia incidida, resultando em um fator entre 0 e 1.

A energia sonora é considerada perdida quando a energia incidente atravessa a estrutura do material, a Eq. (1) apresenta a conversão do coeficiente de absorção para transmissão sonora perdida (TL), expressada em decibéis (dB). Realizar esta conversão para decibéis, não só facilita a maneira de visualizar e comparar, mas fica possível a aplicação de técnicas para medição.

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\alpha} \right) [dB]. \quad (1)$$

Materiais usados para controle de ruído podem ser classificados como absorvedor acústico ou isolante acústico (DALBELLO, 2006). Absorvedor acústico, como por exemplo, a lã de vidro e espumas em geral, são os materiais que possuem propriedades consideradas como “leves”, com menor densidade. Ainda, para um material ser considerado como absorvedor, ele deve deixar que as partículas de ar penetrem nele e se movimentem em seu interior sendo assim absorvidas. Por outro lado, os materiais considerados isolantes, como forros e paredes estruturadas em perfis metálicos, são materiais mais densos, fazendo com que as ondas sonoras não penetrem no material, sendo assim refletida. Materiais absorvedores acústicos podem ser classificados seguindo a seguinte classe.

Tabela 1 - Classificação de materiais porosos

Classe	Coefficiente de absorção
A	$\alpha > 0.9$
B	$0.8 < \alpha < 0.9$
C	$0.6 < \alpha < 0.8$
D	$0.3 < \alpha < 0.6$
E	$0.15 < \alpha < 0.3$
Não classificado	$\alpha < 0.15$

Fonte: PANNETON, 2010.

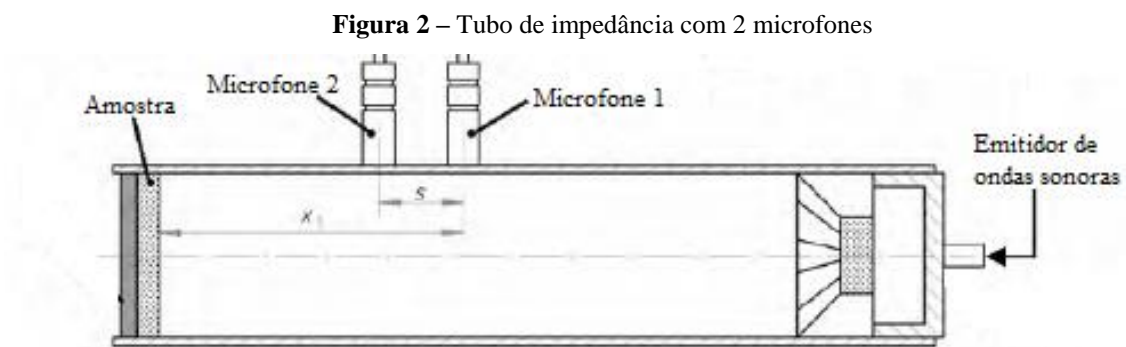
Para medir o coeficiente de absorção, utiliza-se métodos normalizados, sendo que estes devem seguir o padrão imposto por SAE, ISO e ASTM. Dentro destes padrões existem duas classificações com base na natureza da energia sonora incidente: som incidente aleatório ou energia incidente normal. Para realizar estes métodos de medição necessita-se de instrumentos caros, alto tempo de testes e amostras com elevadas dimensões. Portanto, produzir estes protótipos muitas vezes se torna inviável. Por isso foi desenvolvido um método em baixa escala, utilizando amostras menores, que apresente baixo tempo de teste, tal método é conhecido como método do tubo de impedância. Posteriormente, diversos padrões foram desenvolvidos com base neste método para medir absorção e perda da transmissão do som.

2.4 TUBO DE IMPEDÂNCIA

2.4.1 Absorção

Devido ao desenvolvimento de técnicas de processamento de sinal, o coeficiente de absorção sonora pode ser determinado rapidamente e com boa repetitividade, especialmente quando se utiliza o método da função de transferência descrito na norma ISO 10534-2. Este padrão descreve dois métodos: podendo ser utilizado um ou dois microfones.

A teoria no método de dois microfones envolve a decomposição de um dispositivo aleatório estacionário, de sinal banda larga (gerado por um driver acústico), em seus componentes incidentes e refletidos, usando uma simples equação de transferência relacionada entre a pressão sonora em dois locais dentro do tubo, como apresentado na Figura 2. O coeficiente de reflexão é então calculado a partir das propriedades acústicas, avaliando-se a impedância acústica e coeficiente de absorção sonora.



Fonte: Bruel & Kjaer, 2009.

A montagem realizada garante que propagação de onda sonora atue apenas em um plano, isso faz com que o processo descrito na ISO 10534-2 seja válido. A frequência de corte do sistema é dada por,

$$f_c = \frac{1.84c}{\pi d}, \quad (2)$$

onde c é a velocidade do som, em metros por segundo, e d é o diâmetro interno do tubo de impedância, em metros.

A frequência utilizada depende do diâmetro interno do tubo e o espaçamento entre os microfones. O método de medição é baseado no fato de que o fator de reflexão sonora r , pode

ser determinado a partir da função de transferência medida H_{12} entre dois microfones posicionados na frente do material testado.

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}}, \quad (3)$$

sendo $S_{12} = p_2 * p_{1*}$ é o espectro cruzado entre dois microfones; $S_{11} = p_1 * p_{1*}$ é o auto espectro do microfone 1.

O fator de transferência pode ser calculado por,

$$r = \frac{H_{12} + H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1}, \quad (4)$$

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c}, \quad (5)$$

$$H_I = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0S}, \quad (6)$$

$$H_R = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0S}, \quad (7)$$

onde H_I é a função de transferência para onda incidente sozinha na Eq. (6) e H_R é a função transferência para onda refletida sozinha na Eq. (7); x_1 é a distância entre a amostra e o primeiro microfone; k_0 é o número da onda Eq. (5), f é frequência em hertz, S é a distância entre dois microfones.

Portanto o coeficiente de absorção pode ser definido como,

$$\alpha = 1 - r^2, \quad (8)$$

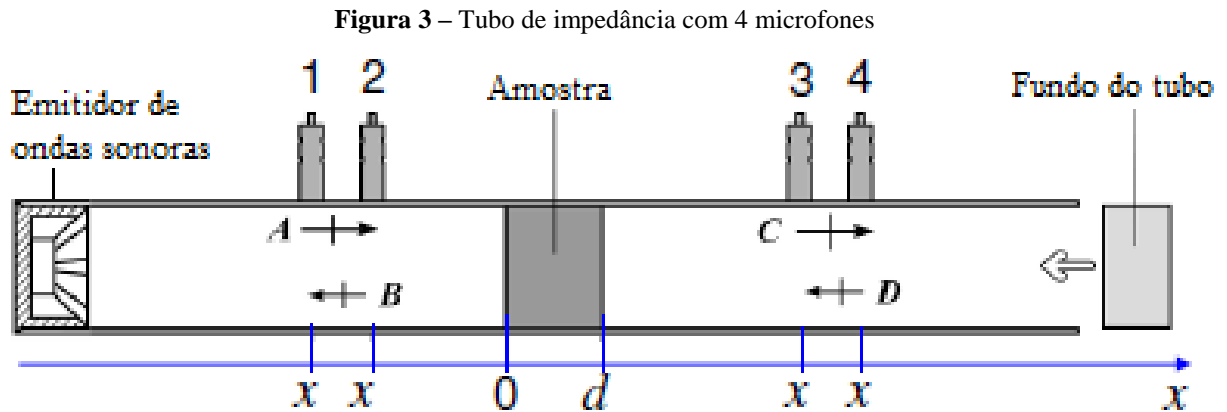
E a taxa de impedância acústica,

$$\frac{z}{pc} = \frac{R}{pc} + \frac{jX}{pc} = \frac{1+r}{1-r}, \quad (9)$$

sendo R é o termo real da impedância, X o termo imaginário e pc a impedância característica.

2.4.2 Transmissibilidade

A técnica para transmissibilidade segue uma metodologia semelhante a medição de absorção, diferindo-se pelo fato da transmissibilidade usar dois microfones antes e dois microfones depois da amostra, totalizando quatro microfones, como apresentado na Figura 3.



Fonte: Editado pelo autor. Da fonte Bruel & Kjar, 2009/

Seguindo o processo descrito pela ISO 10534-2, esta disposição faz com que as ondas sonoras sejam propagadas em apenas uma direção (eixo x). Segundo Bruel e Kjaer, podemos calcular a transmissibilidade como demonstrado a seguir. As pressões no microfone são calculadas da seguinte forma,

$$P_1 = (Ae^{-jk_0x_1} + Be^{jk_0x_1}), \quad (10)$$

$$P_2 = (Ae^{-jk_0x_2} + Be^{jk_0x_2}), \quad (11)$$

$$P_3 = (Ce^{-jk_0x_3} + De^{jk_0x_3}), \quad (12)$$

$$P_4 = (Ce^{-jk_0x_4} + De^{jk_0x_4}). \quad (13)$$

Determinando os coeficientes A, B, C e D. Tendo k_0 calculado a partir da Eq. (5).

$$A = \frac{j(P_1e^{jk_0x_2} - P_2e^{jk_0x_1})}{2\text{sen}k(x_1 - x_2)}, \quad (14)$$

$$B = \frac{j(P_2 e^{-jkx_1} - P_1 e^{-jkx_2})}{2 \operatorname{sen} k(x_1 - x_2)}, \quad (15)$$

$$C = \frac{j(P_3 e^{jkx_4} - P_4 e^{jkx_3})}{2 \operatorname{sen} k(x_3 - x_4)}, \quad (16)$$

$$A = \frac{j(P_4 e^{-jkx_3} - P_3 e^{-jkx_4})}{2 \operatorname{sen} k(x_3 - x_4)}. \quad (17)$$

Resumindo-se da seguinte forma, como demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Pressões e velocidades em determinados pontos da amostra

$$P = (Ae^{-jkx} + Be^{jkx}) \quad P = (Ce^{-jkx} + De^{jkx})$$

$$V = (Ae^{-jkx} - Be^{jkx})/\rho_0 c \quad V = (Ce^{-jkx} - De^{jkx})/\rho_0 c$$

$$P|_{x=0} = (A + B)$$

$$V|_{x=0} = (A - B)/\rho_0 c$$

$$P|_{x=d} = (Ce^{-jkd} + De^{jkd})$$

$$V|_{x=d} = (Ce^{-jkd} - De^{jkd})/\rho_0 c$$

Fonte: ATALLA, 2005.

Temos a seguinte matriz de transferência, onde T é a transmissibilidade entre os pontos e TLn a transmissibilidade do material.

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=d} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(a) & P(b) \\ P(a) & V(b) \end{bmatrix}$$

Retornando a transmissão perdida do sistema,

$$TL_n = 10 \log_{10}(a_{11}^2) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4} T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c} + \rho_0 c T_{21} + T_{22} \right). \quad (19)$$

Um material considerado homogêneo, isotropicamente poroso pode ser considerado um fluido (BASSANTE, 2007). O número de onda complexa k_p e a impedância característica $\rho_c c_p$ podem ser calculados da seguinte forma.

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_p d) & j\rho_p c_p \operatorname{sen}(k_p d) \\ j\operatorname{sen}(k_p d) / \rho_p c_p & \cos(k_p d) \end{bmatrix}$$

$$k_p = \frac{1}{d} \cos^{-1}(T_{11})$$

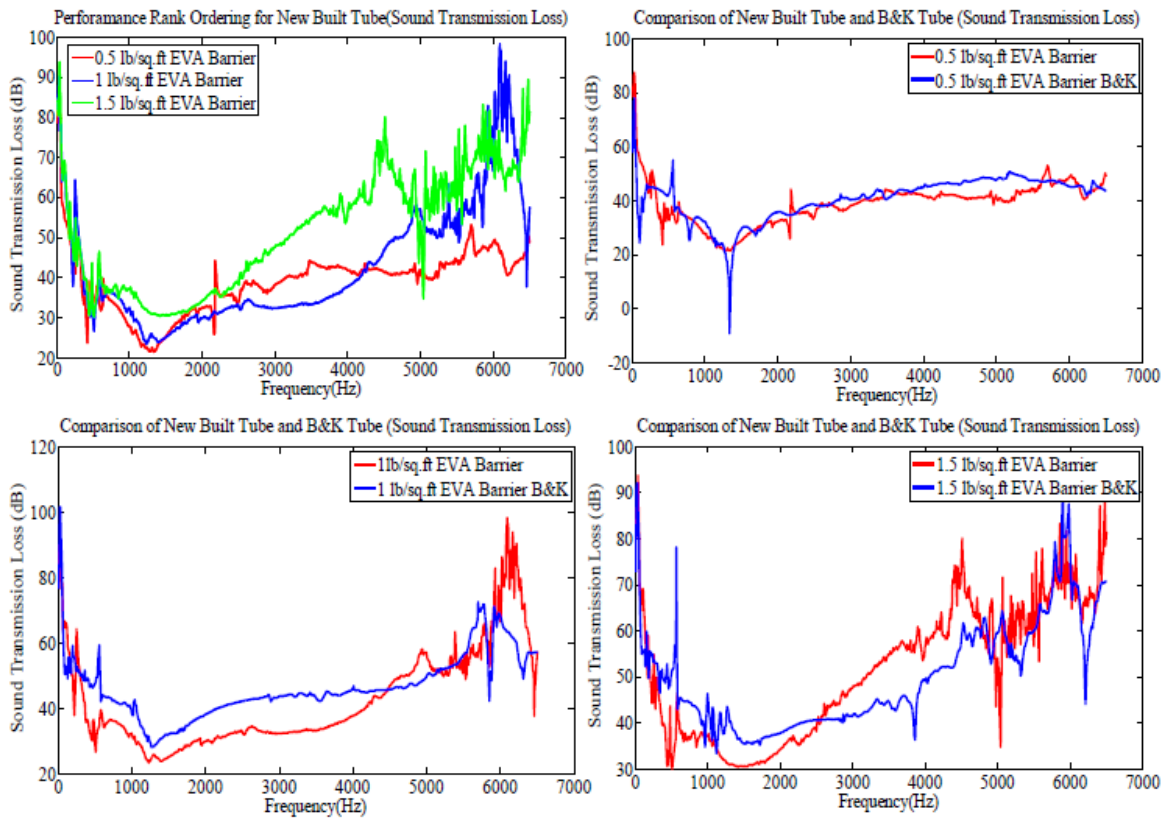
$$\rho_p c_p = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}}$$
(20)

2.5 MATERIAIS TESTADOS EM UM TUBO DE IMPEDÂNCIA

Com base em um estudo realizado pelas engenheiros *Mr. Satyajeet P Deshpande e Dr. Mohan D. Rao*, das empresas *Kolano and Saha Engineers, Inc. e Tennessee Technological University* respectivamente, o qual criaram um tubo de impedância usando os cálculos demonstrados anteriormente e comparando com um tubo de impedância da B&K. Usando estes dados e testes, os resultado obtido para diversos materiais considerados isolantes acústicos, entre eles fibra de vidro, EVA, algodão e espuma, pode ser observado na Figura 5. Nos experimetos foi utilizado apenas o EVA para o teste de perda de transmissão, como apresentado na Figura 5. Primeiramente, foi realizado um raqueamento da densidade do EVA e então realizado teste um a um.

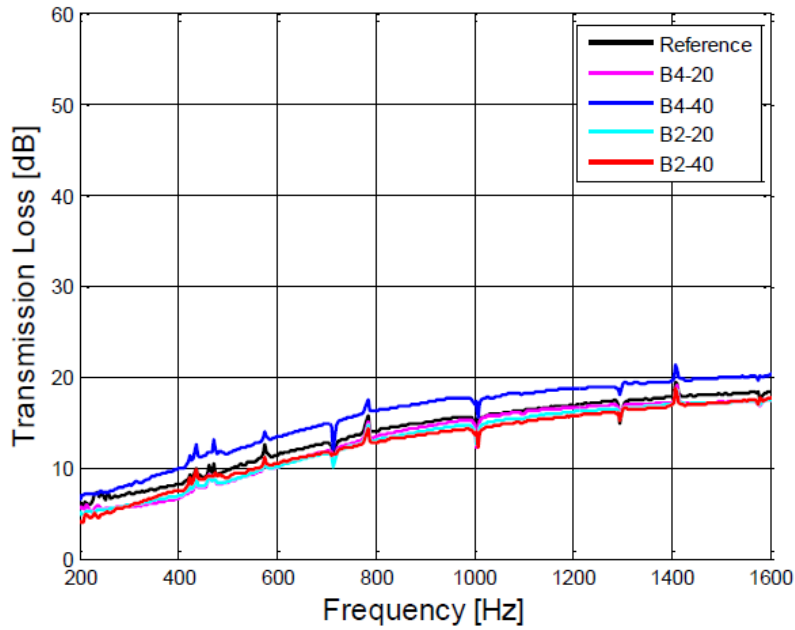
Outro estudo realizado por Freitas (2017), o qual realizou a caracterização de um material com base nas propriedades acústicas. O material estudado remete-se a aplicação em infraestrutura, no caso as propriedades acústicas da borracha inserida em argamassas de cimento. O estudo baseou-se no mesmo método de aplicação utilizado no estudo, utilizando um tubo de impedância para a caracterização do material e analisando sua aplicabilidade para o controle de ruído. A Figura 6 apresenta os resultados referente a perda de transmissão.

Figura 5 - Perda de Transmissão testada em um tubo de impedância.



Fonte: DESHPANDE, 2014.

Figura 6 - Resultados obtidos por Yasmin, material: argamassa com borracha.

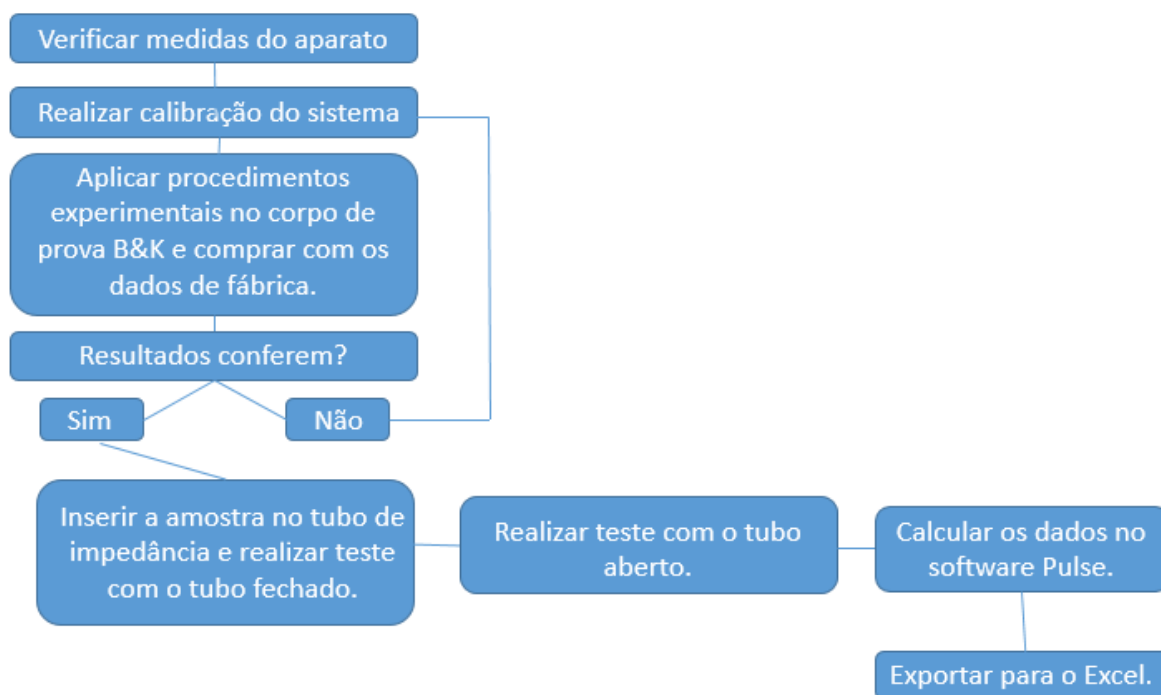


Fonte: FREITAS, 2017.

3 METODOLOGIA

A Figura 7 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho.

Figura 7 – Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O primeiro passo consiste em verificar as medidas no aparato experimental, entre elas estão as distâncias entre microfones, distância entre microfone e amostra e diâmetro do tubo.

Figura 8 - Medições no aparato experimental

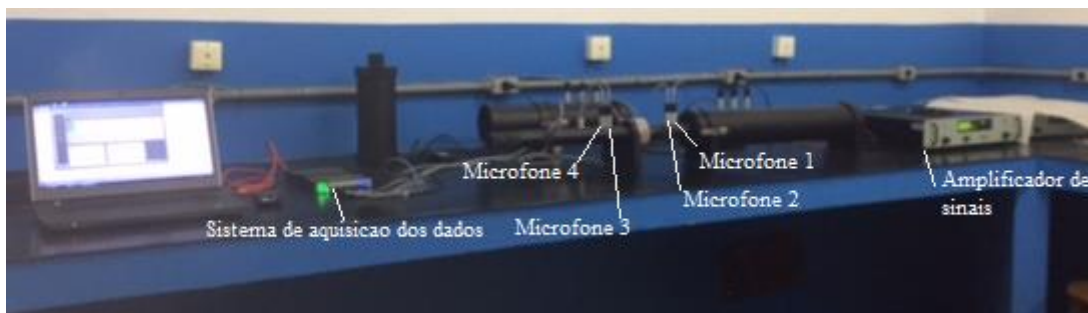


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após verificado a consistência dos dados, passasse então para fase seguinte, onde serão realizadas as medidas para calibração do setup experimental. Neste passo, após montagem da

bancada (Figura 9), realiza-se a calibração com todos os microfones posicionadas nas distâncias pré-determinadas no passo anterior. Realiza-se a medição com os 4 microfones nas respectivas posições (Figura 9). Após essa aquisição de dados, deve-se trocar o microfone 1 com o 2 e então realizar a medição novamente, então voltar a posição inicial e trocar o microfone 1 com o 3, por fim voltar a posição inicial novamente e trocar o microfone 1 com o 4, após todas estas etapas deve-se retornar os microfones para seus respectivos lugares (Figura 9). Vale ressaltar que esta etapa é realizada com o tubo de impedância sem amostras.

Figura 9 – Setup experimental para análise de perda de transmissão



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após a calibração ter sido realizada, deve-se prosseguir para o terceiro passo, que consiste em validar a calibração, para isso usa-se um corpo de prova padrão, de espuma da B&K. Esta validação consiste em testar a amostra padrão e comparar com o gráfico da própria B&K. O teste refere-se ao mesmo teste que será realizado com as amostras, compara-se então o resultado obtido com o recebido pela B&K, se os resultados obtidos forem correlatos então pode-se confirmar que a calibração foi feita de modo correto e então validada.

Finalmente, o último passo consiste em realizar as medições nas amostras. Realizar-se dois testes para cada amostra, um com o tubo de impedância fechado na sua extremidade e outro com ele aberto. Considera-se a faixa 200 Hz até 1600 Hz, para as amostras de 100mm de diâmetro e 1600 Hz até 6400 Hz para as amostras de 29mm de diâmetro.

3.1 MATERIAIS

A bancada de testes consiste em um tubo de impedância Bruel & Kjaer Type 4206 (Figura 10-11), quatro microfones, todos B&K Type 4187 (Figura 12), com a seguinte sensibilidade, 2760141 – 3,72mV/Pa, 2760142 - 3,83 mV/Pa, 2760127 - 3,95 mV/Pa e 2760128 – 3,78mV/Pa, e um amplificador de potência B&K Type 2732 (Figura 13), conectado a um sistema de

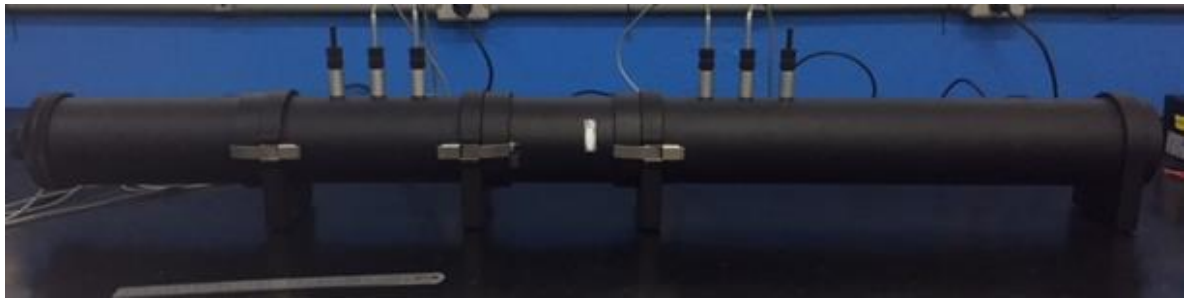
aquisição de sinais 4/2 chanel B&K Type 3160-A-042 (Figura 14), que foi controlado pelo software Pulse.

Figura 10 – Tubo de impedância para amostras menores (29mm)



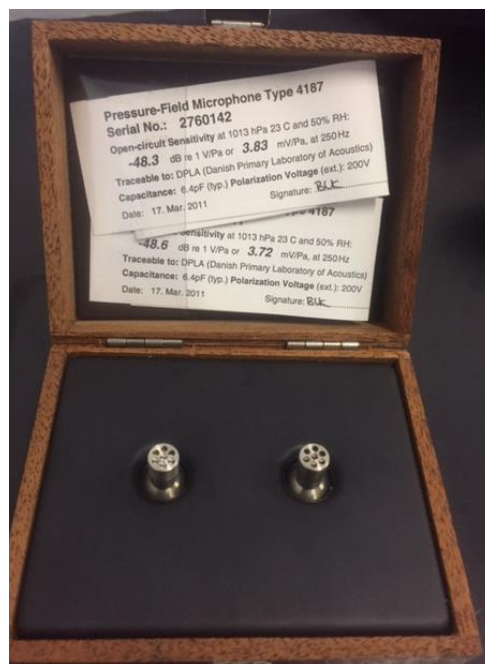
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 11 – Tubo de impedância para amostras maiores (100mm)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 12 – Microfones para os testes



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 13 – Amplificador de potência Type 2732



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 14 – Módulo de aquisição B&K Type 3160-A-042



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A análise foi realizada em 54 amostras, fornecidas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), estas amostras foram divididas em 3 grupos e 6 subgrupos, sendo 18 unidades de cada grupo e 3 unidades de cada subgrupo. Compara-se a diferença de transmissibilidade conforme a degradação do tempo (6 meses) e conforme o aumento no percentual de alumina.

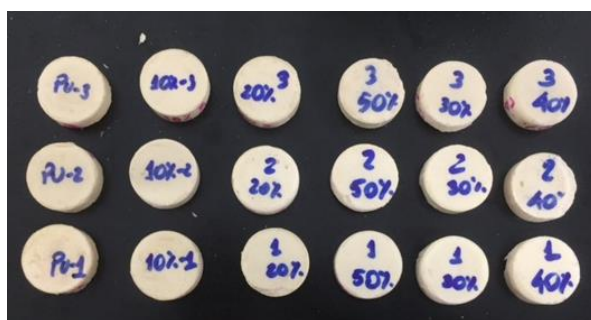
Tabela 2 – Matriz de amostras experimentais

Diâmetro	Amostras	Quantidade
29 mm	Nov. 2017 – PU Puro	3
29 mm	Nov. 2017 – PU 10% Alumina	3
29 mm	Nov. 2017 – PU 20% Alumina	3
29 mm	Nov. 2017 – PU 30% Alumina	3
29 mm	Nov. 2017 – PU 40% Alumina	3
29 mm	Nov. 2017 – PU 50% Alumina	3
29 mm	Mai. 2018 – PU Puro	3
29 mm	Mai. 2018 – PU 10% Alumina	3
29 mm	Mai. 2018 – PU 20% Alumina	3
29 mm	Mai. 2018 – PU 30% Alumina	3
29 mm	Mai. 2018 – PU 40% Alumina	3
29 mm	Mai. 2018 – PU 50% Alumina	3
100 mm	Mai. 2018 – PU Puro	3
100 mm	Mai. 2018 – PU 10% Alumina	3
100 mm	Mai. 2018 – PU 20% Alumina	3
100 mm	Mai. 2018 – PU 30% Alumina	3
100 mm	Mai. 2018 – PU 40% Alumina	3
100 mm	Mai. 2018 – PU 50% Alumina	3

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 15 apresenta os corpos de provas com diâmetro de 29 mm e a Figura 16 os corpos de provas com diâmetro de 100 mm.

Figura 15 – Amostras com diâmetro de 29mm (a) vista superior e (b) análise da espessura



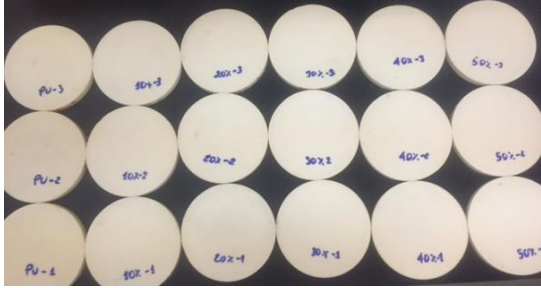
(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 16 – Amostras com diâmetro de 100mm (a) vista superior e (b) análise da espessura



(a)



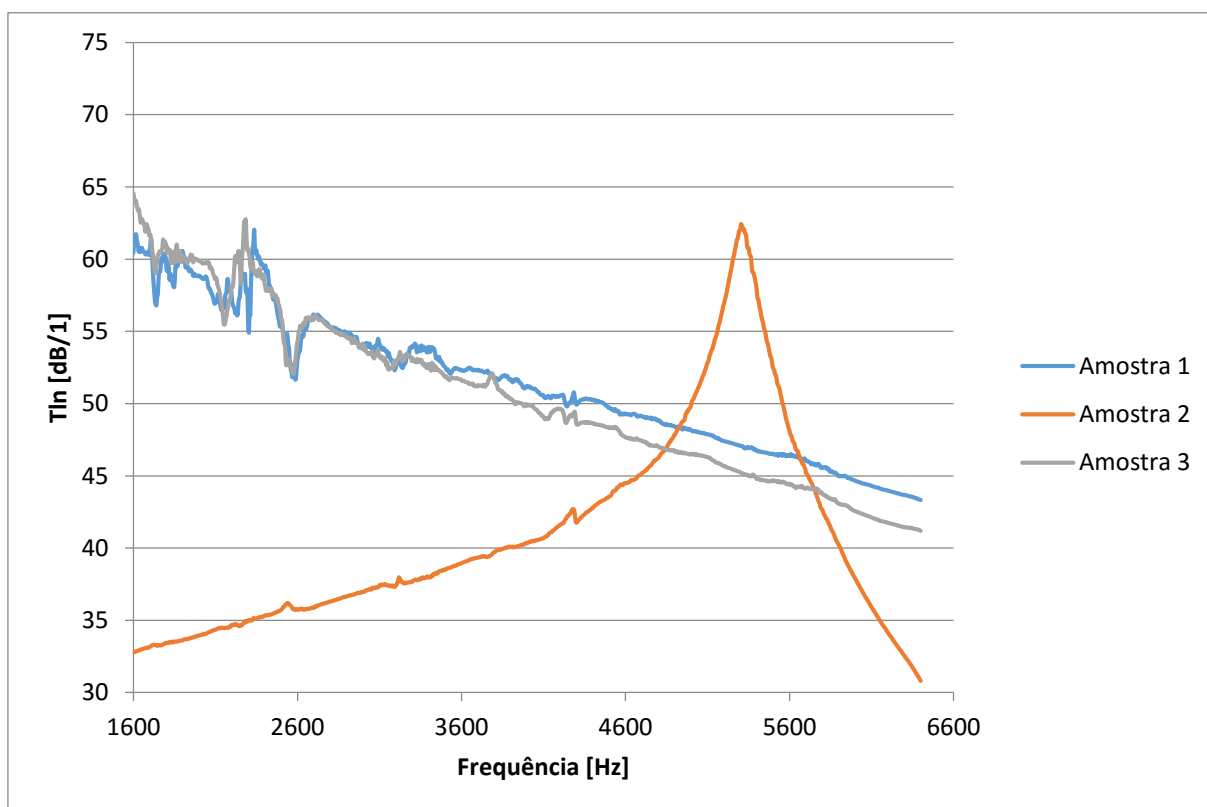
(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

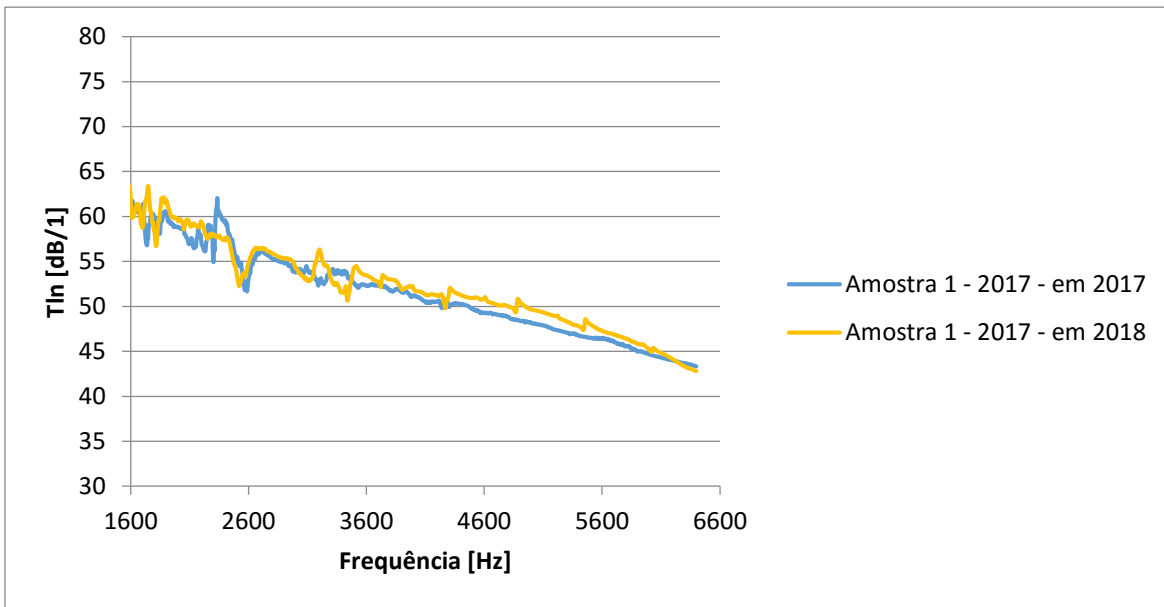
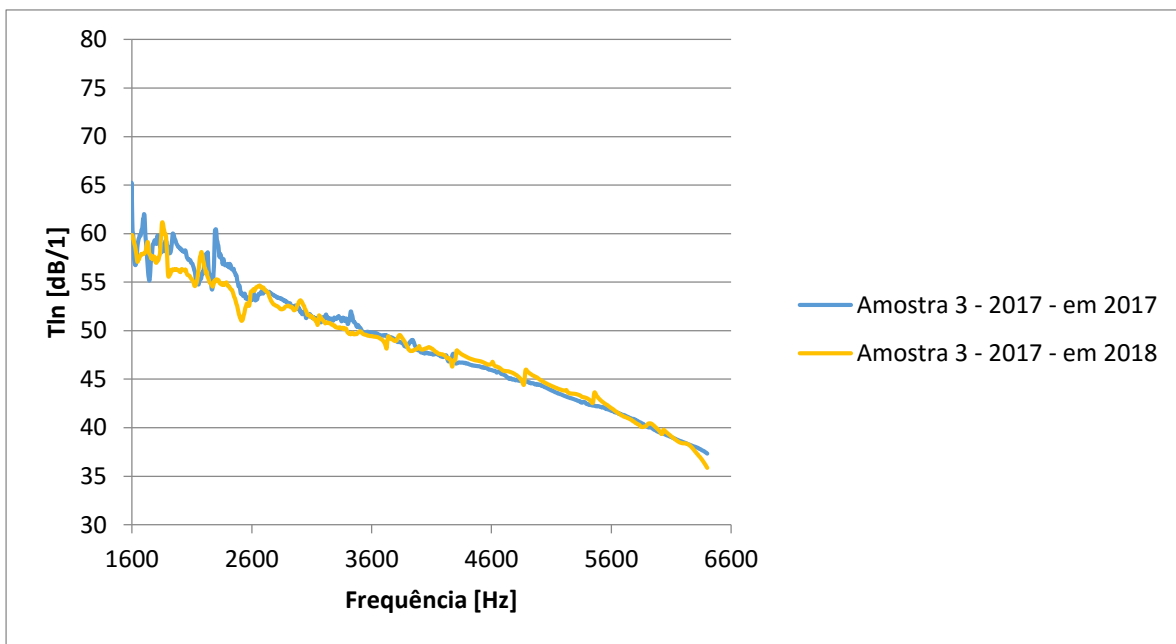
Para a análise dos resultados obtidos comparamos as 3 amostras de cada subgrupo observando então se havia uma correlação entre os resultados, se houvesse algum resultado fora do padrão, o resultado seria descartado.

Figura 17 - Resultados amostra PU – 10% de 2017



Pode-se observar que as amostras 1 e 3 possuem correlação entre seus dados observados, entretanto a amostra 2, demonstra um resultado totalmente fora do esperado. O motivo pelo qual houve desta divergência deve-se a homogeneização dos materiais da amostra.

Após realizada esta análise preliminar dos dados, faz-se então comparações entre as amostras com diferentes datas de fabricação, 2017 e 2018, para observar se há uma diferença de resultados devido à degradação do material com o tempo. Neste teste, somente será considerado as amostras de diâmetro igual a 30mm.

Figura 18 – PU Puro - 29mm**Figura 19 – PU com adição de 10% Alumina – 29mm**

Observa-se nas Figuras 18-23, que as amostras não demonstraram diferença dos resultados devido ao tempo. Com isso, utilizaremos as amostras de 2018 para comparação entre o percentual de alumina entre as amostras. Para fim de comparação entre as amostras de 30mm, utilizou-se as amostras número 1 para todos, exceto para o PU com 20% que foi utilizado a amostra número 3. Já para as amostras de 100mm, utilizou-se as amostras de número 1 para 10%, 20%, 30% e 40%, e amostras de número 2 para PU puro e 50%. Obtendo-se então o resultado apresentado na Figura 24.

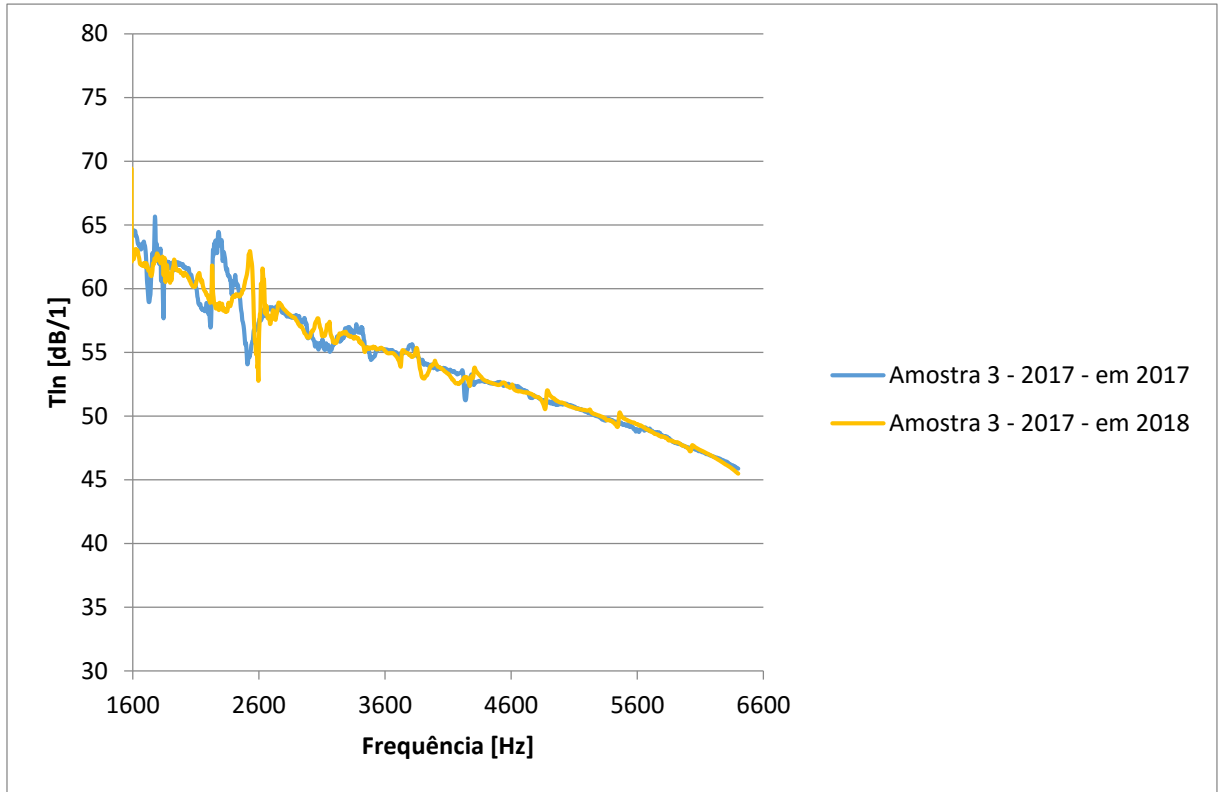
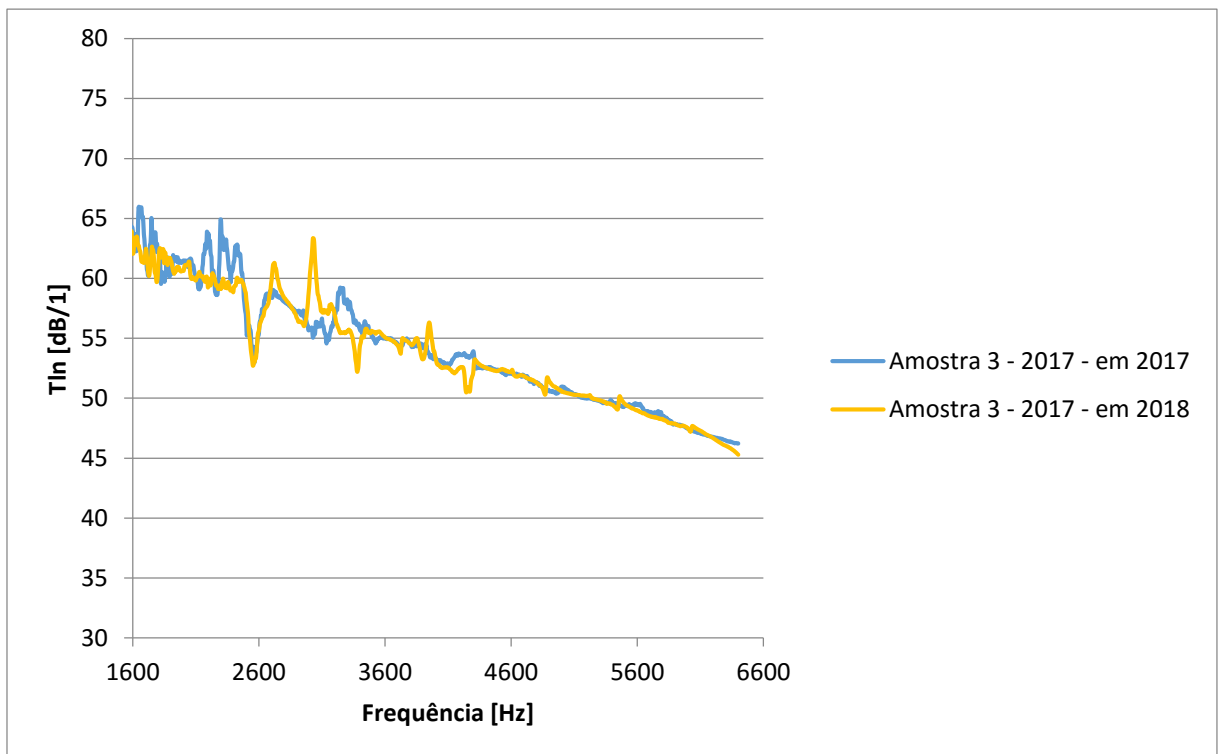
Figura 20 – PU com adição de 20% Alumina – 29mm**Figura 21** – PU com adição de 30% Alumina – 29mm

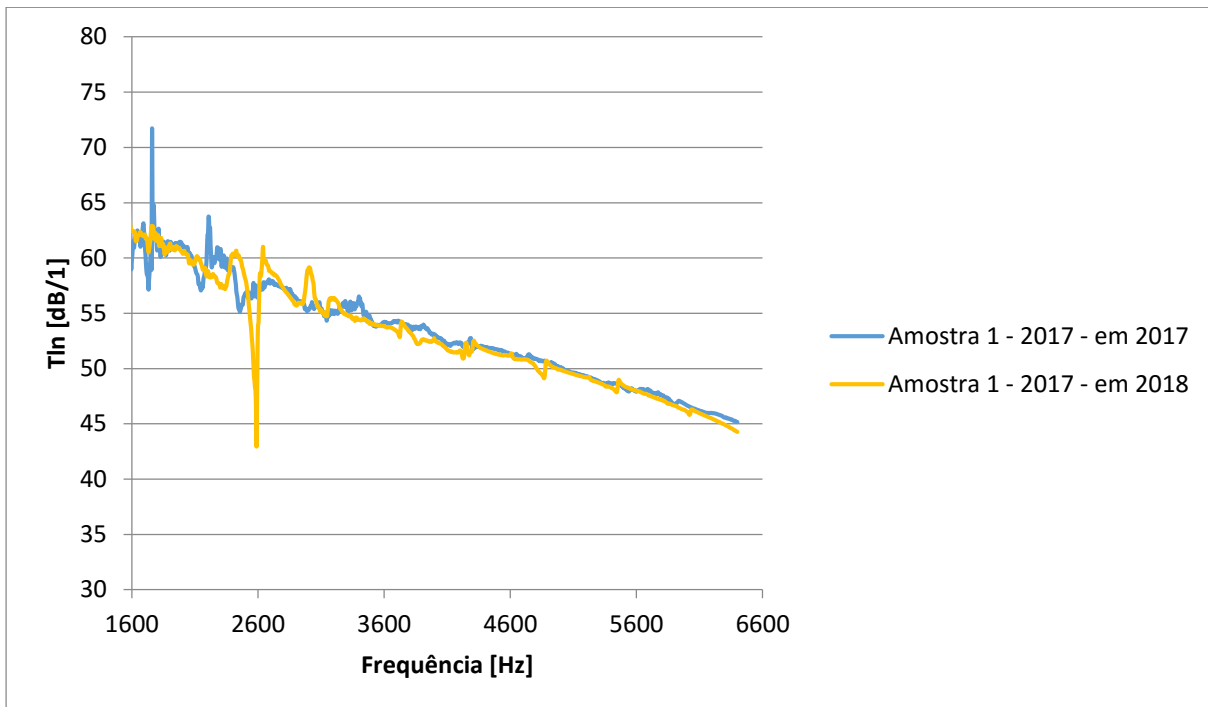
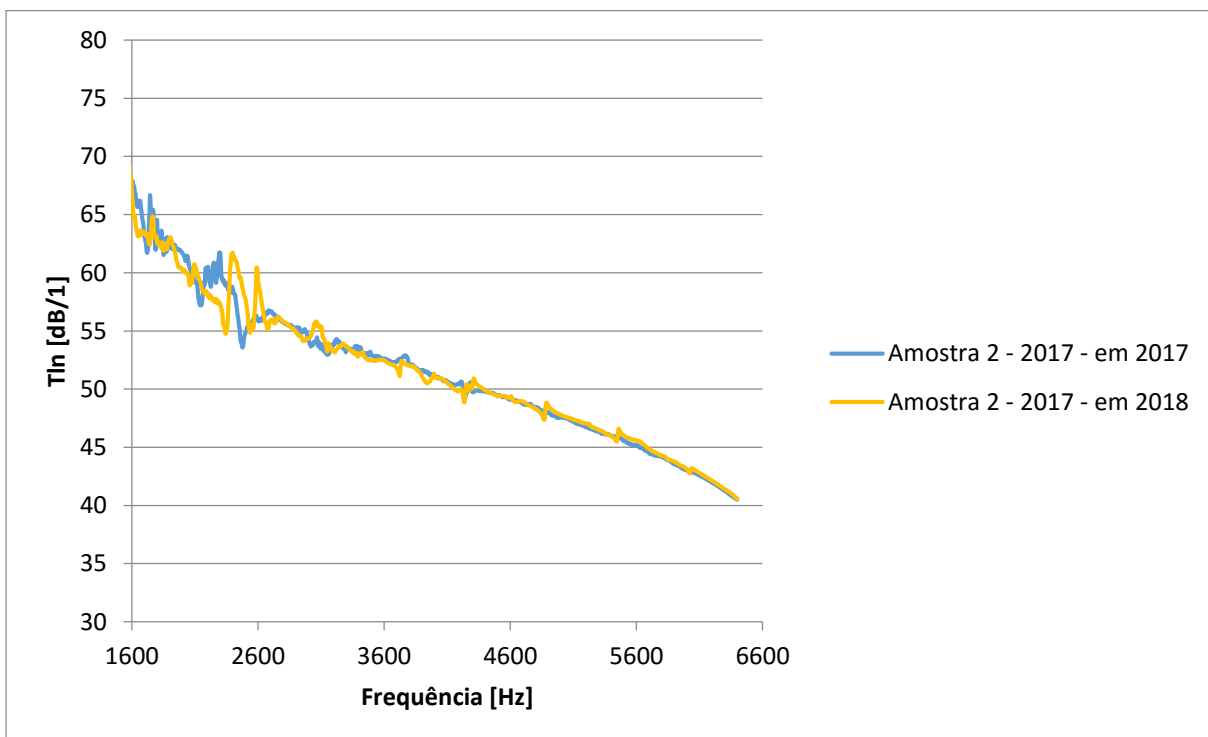
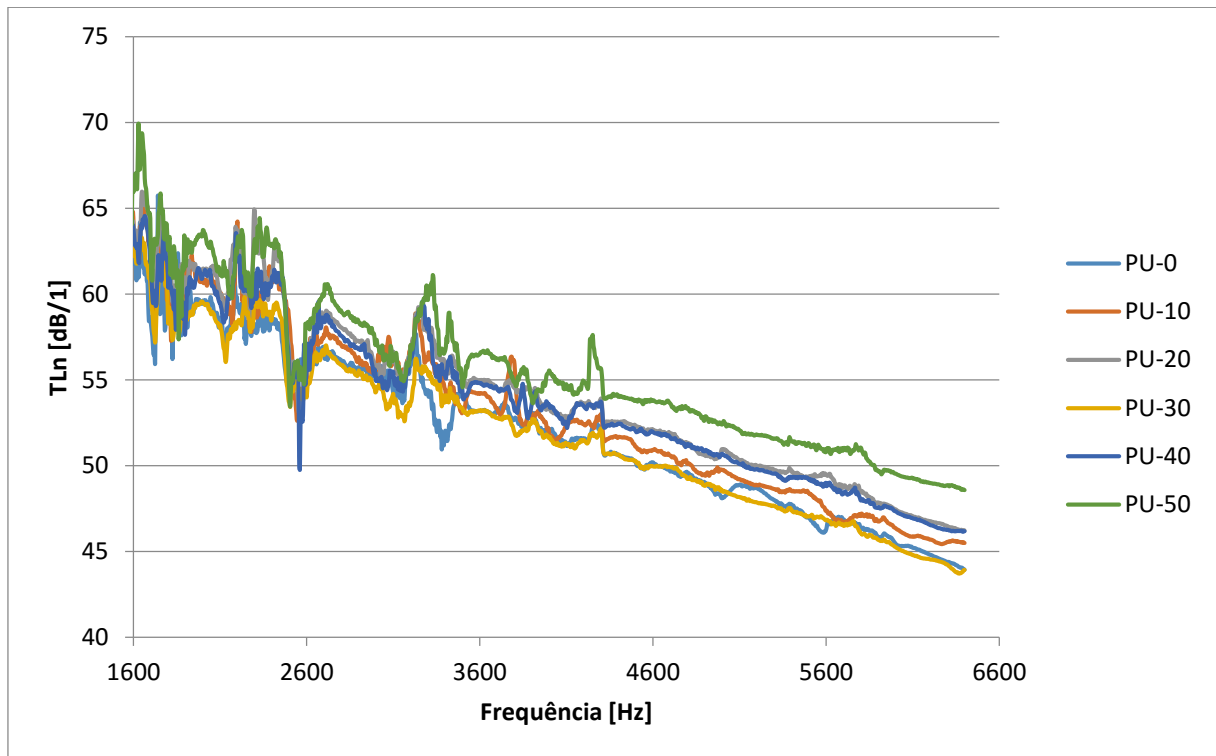
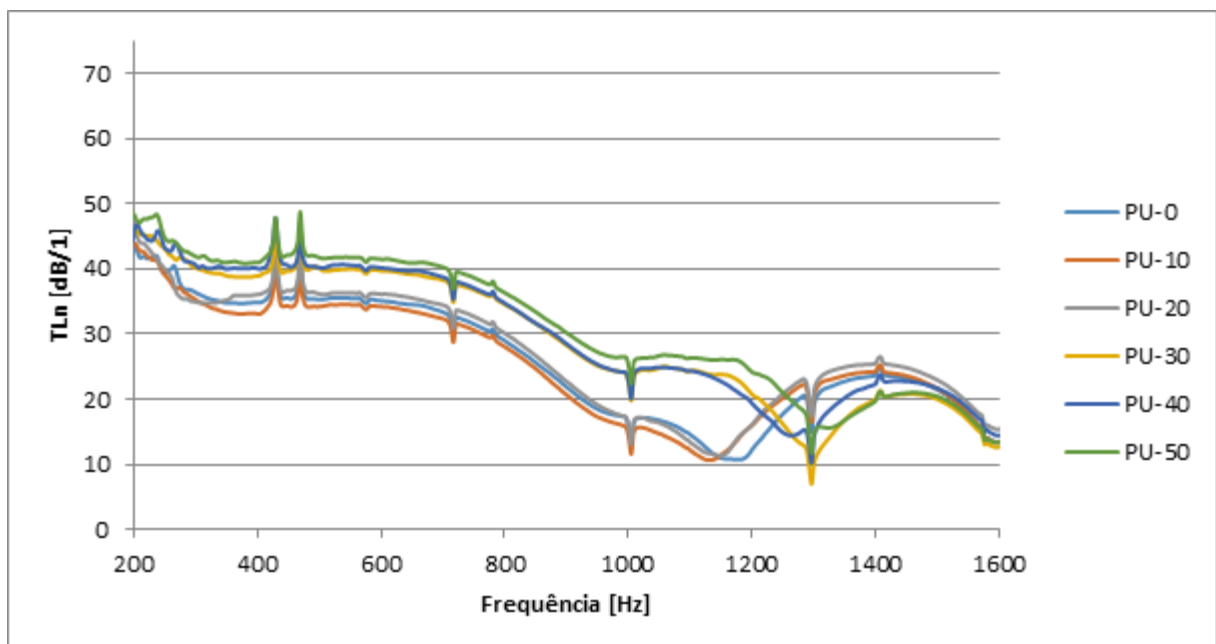
Figura 22 – PU com adição de 40% Alumina – 29mm**Figura 23** – PU com adição de 50% Alumina - 29mm

Figura 24 – Resultados para as diferentes frações de alumina das amostras de diâmetro igual 29 mm



Nas amostras de 29 mm observou-se que conforme aumentamos a frequência a transmitibilidade diminui, algo em torno de 45db, porém quando aumentamos o percentual de alumina no aumenta algo em torno de 10db se compararmos as amostras PU puro e 50%, duas extremidades.

Figura 25 – Resultados para as diferentes frações de alumina das amostras de diâmetro igual 100 mm



As amostras de 100 mm apresentam um comportamento pouco diferente quando comparada com as amostras de diâmetro 29 mm, entre as frequências 200 Hz e 1200 Hz para as amostras pura, 10% e 20% diminui a perda de transmissibilidade, porém em 1200 Hz até 1400 Hz, volta a subir e depois decresce, terminando com uma perda de transmissibilidade maior em 1600 Hz do que 1200 Hz. Porém quando aumentamos o percentual de alumina, para 30%, 40% e 50%, acontece um resultado um pouco diferente, a perda de transmissibilidade sobre apenas nos 1300 Hz, decrescendo nos mesmos 1400 Hz como as outras amostras e terminando exatamente igual as amostras anteriores, em 1600 Hz.

4.1 CARACTERIZAÇÃO

Por se tratar de um teste totalmente experimental, deve-se utilizar materiais já testados e aceitos para ambientes onde necessita-se de um isolamento acústico, neste trabalho utilizar-se como método de comparação o EVA, material bom para isolamento acústico e temos seus resultados experimentais demonstrados na Figura 7, junto com esta comparação utilizaremos a norma 15.575/2013 ABNT, que nos diz que a medição de ruído entre paredes de apartamentos ou dormitórios deve estar entre 45dB permitidos.

Tabela 3 - Resultados EVA com base nos resultados da empresa Kolano e Saha Engineers

EVA	TLn
0,5 lb/sq	50dB
1 lb/sq	50dB-55dB
1,5lb/sq	50dB-85dB

Tabela 4 - Demonstração dos resultados das amostras

Material	29 mm	100 mm
PU Puro	44dB-65dB	15dB-45dB
PU 10%	46dB-65dB	15dB-45dB
PU 20%	47dB-65dB	15dB-45dB
PU 30%	44dB-65dB	15dB-45dB
PU 40%	47dB-65dB	15dB-45dB
PU 50%	49dB-65dB	15dB-45dB

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Utilizado como comparação, o EVA de maior densidade, nos traz uma transmissibilidade entre 50 e 85 dB, entretanto o poliuretano com óleo de mamona possui perda de transmissibilidade entre 15 e 45dB, ou seja, como o EVA é considerado uma barreira para o som, podemos caracterizar nosso material como barreira também devido a transmissibilidade do som ser menor.

5 CONCLUSÕES

Com base no objetivo principal, avaliar o efeito da adição de alumina nas propriedades sonoras do PU, podemos concluir que para as amostras que possuem menores diâmetros, 30mm, conforme aumenta o percentual de alumina a perda de transmissibilidade aumenta, ou seja, quanto mais alumina maior o som transmitido através do material. Porém tivemos alguns pontos a ressaltar em algumas amostras, o PU com 30% obteve o mesmo resultado que o PU puro, o mesmo aconteceu com as amostras de 20% e 40%, isso pode ser um fato muito relevante na hora da escolha do material para o isolamento. Para a escolha certa do material pode ser estudado a frente com o estudo da flamabilidade conforme o aumento de alumina, encontrando então o ponto ótimo para a aplicação.

Para as amostras de maiores diâmetros, 100mm, conforme aumentamos a alumina no material maior a transmissibilidade dele, porém este fato se aplica apenas para as frequências de 200-1100Hz, após este ponto a transmissibilidade se inverte, então quanto menor o grau de alumina maior a transmissibilidade do material. Ponto que podemos ressaltar também é que os materiais puro, 10% e 20% possuem exatamente as mesmas propriedades, o mesmo acontece entre as amostras de 30%, 40% e 50%.

Outro ponto estudou-se foi a degradação do material com o tempo, vimos que em todas as amostras os resultados se mantiveram após seis meses, pode-se estudar para períodos mais longos, vendo se o material perde propriedades sonoras com o tempo.

Como demonstrado no estudo podemos observar que o material PU possui aplicabilidade no isolamento do som, mesmo o PU com 50% de alumina, possui características melhores do que o EVA comparado no estudo.

Trabalhos futuros que podem complementar este estudo são os seguintes, estudar o efeito contra a chama que tem a alumina aplicada ao PU e estudar efeitos da degradação do material com tempo maior do que seis meses.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PASSERI, Lineu. **Absorção sonora x Isolamento acústico: entenda as diferenças.**

Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/absorcao-sonora-x-isolamento-acustico-entenda-as-diferencas_15424_10_0>. Acesso em: 09 jun. 2018.

ARQUES, Bruno Rafael. **POLIURETANO DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA: De Meio Ambiente a Biocompatibilidade.** 2009. 16 p. Dissertação (Química)- Universidade Federal Paulista de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2009.

MICHALSKI, Ranny L. X. N. **Absorção sonora.** 2008. 47 f. Apresentação (Arquitetura e Urbanismo)- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0135/05%20-%20Absor%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 09 jun. 2018.

CATAI, Rodrigo Eduardo; PENTEADO, André Padilha; DALBELLLO, Paula Ferraretto. **MATERIAIS, TÉCNICAS E PROCESSOS PARA ISOLAMENTO ACÚSTICO.** 2006. 12 p. Artigo (Engenharia e Ciência dos Materiais)- UTFPR, Curitiba, 2006. Disponível em: <<http://www.ceap.br/material/MAT12032009181855.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Níveis de ruído para conforto acústico.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 2 p. Disponível em: <http://www.joaopessoa.pb.gov.br/portal/wp-content/uploads/2015/02/NBR_10152-1987-Conforto-Ac_stico.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2018.

SILVA, Diego Willian Da. **CARACTERIZAÇÃO INVERSA VIBROACÚSTICA DE MATERIAIS POROSOS EM TUBO DE IMPEDÂNCIA.** 2018. 82 p. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.

SILVA, Gabriela Cristina Cândido da. **DESIGN AND CONSTRUCTION OF A LOW COST IMPEDANCE TUBE FOR SOUND ABSORPTION COEFFICIENTS MEASUREMENTS**. 2013. 11 p. Dissertação (Mechanical Engineering)- Universidade de Brasília, São Paulo, 2013.

DESHPANDE, Mr Satyajee P.; RAO, Dr. Mohan D. **DEVELOPMENT OF A LOW COST IMPEDANCE TUBE TO MEASURE ACOUSTIC ABSORPTION AND TRANSMISSION LOSS OF MATERIALS**. 2014. 15 p. Dissertação (Mechanical Engineering)- Tennessee Technological University, Indianópolis, 2014.

ATALLA, Youssef. **Inverse Acoustical Characterization Of Open Cell Porous Media Using Impedance Tube Measurements**. 2005. 16 p. Dissertação (Département génie mécanique)- Université de Sherbrooke, Sherbrooke,, 2005.

HERRIN, D. W. **Measurement of Sound Absorption and Impedance**. 2012. 17 p. Dissertação (Dept. of Mech. Engineering)- University of Kentucky, Kentucky, 2012.

CARDOSO, Oldemar Ribeiro; BALABAN, Rosangela de Carvalho. **Preparação de Resinas de Poliuretana à Base de Óleo de Mamona e Dietanolamina e sua Aplicação em Circuitos Eletroeletrônicos**. 2013. 7 p. Dissertação (Química)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/2013nahead/aop_1086.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2018.