

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ HENRIQUE KLEINÜBING LARCHER

MATHEUS HENRIQUE WACHHOLZ

**CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM TUBO DE IMPEDÂNCIA PARA  
MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

JOSÉ HENRIQUE KLEINÜBING LARCHER

MATHEUS HENRIQUE WACHHOLZ

## **CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM TUBO DE IMPEDÂNCIA PARA MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 - TCC2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Henrique de Avelar Gomes

CURITIBA

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Márcio Avelar pela paciência, ensinamentos e momentos de descontração e conforto.

Aos pais, familiares e companheiros pelo apoio e incentivo.

Aos amigos de graduação pelas conversas.

Aos demais professores e colegas pelo apoio e conhecimentos compartilhados.

*“Você não é derrotado quando perde, mas sim quando desiste.”*

**(Akira Toriyama)**

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM TUBO DE IMPEDÂNCIA PARA MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO", realizado pelos alunos JOSÉ HENRIQUE KLEINÜBING LARCHER e MATHEUS HENRIQUE WACHHOLZ, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Marcio Henrique de Avelar Gomes

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Nilson Barbieri

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. João Morais da Silva Neto

DEMEC, UFPR

Avaliador

Curitiba, 06 de dezembro de 2018.

## RESUMO

LARCHER, José H. K.; WACHHOLZ, Matheus H. Construção e teste de um Tubo de Impedância para medição de isolamento. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Devido ao crescente aumento de poluição sonora, principalmente em grandes centros urbanos, a necessidade de isolamento acústico com a finalidade de aumentar o conforto e diminuir os danos causados pelo ruído aumentou. Para utilização e pesquisa de materiais com esse objetivo, algumas propriedades devem ser analisadas, uma dessas propriedades é a Perda de Transmissão (TL). O presente trabalho tem como foco o projeto, construção e posterior validação de um aparelho chamado Tubo de Impedância, capaz de medir a propriedade TL, com a utilização do Método da Matriz de Transferência que, por apresentar uma boa repetibilidade, torna possível a utilização de apenas um microfone de captação de sinais, reduzindo significativamente o custo de produção. O projeto do protótipo é apresentado em detalhes, bem como seu processo de manufatura e validação. A técnica utilizada se baseia na obtenção de dados utilizando um *Toolkit* de *MATLAB*, com tratativa dos dados implementada em sua linguagem de programação, utilizando o Método da Matriz de Transferência e o Método das Duas Cargas. Resultados de medições feitas com o tubo sem amostra resultaram em Perda de Transmissão próxima de zero, conforme esperado. Medições de uma amostra de material poroso foram feitas para comparar resultados com aqueles obtidos em outro Tubo de Impedância e mostraram um desempenho semelhante. Amostras feitas de madeira e de alumínio também foram medidas e mostraram resultados aquém daquele obtido a partir de uma estimativa baseada em modelo matemático.

**Palavras-chave:** Tubo de Impedância; Acústica; Isolamento Acústico; Perda de Transmissão; Matriz de Transferência.

## ABSTRACT

LARCHER, José H. K.; WACHHOLZ, Matheus H. Construção e teste de um Tubo de Impedância para medição de isolamento. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Due to the increasing noise pollution, especially in large urban centers, the need for sound insulation in order to increase comfort and reduce noise damage has increased. To use and research for materials for this purpose, some properties must be analyzed, one of these properties is Transmission Loss (TL). The present work focuses on the design, construction and subsequent validation of a device called Impedance Tube, capable of measuring the TL property, using the Transfer Matrix Method which, because of its good repeatability, makes it possible to use only a signal pickup microphone, significantly reducing the cost of production. The prototype design is presented in detail as well as its manufacturing and validation process. The technique used is based on obtaining data using a MATLAB Toolkit, with data treatment implemented in its programming language, using the Transfer Matrix Method and the Two Loads Method. Results of measurements made with the sampled tube resulted in Transmission Loss close to zero as expected. Measurements of a sample of porous material were made to compare results with those obtained on another Impedance Tube and showed similar performance. Samples made of wood and aluminum were also measured and showed results below that obtained from an estimate based on a mathematical model.

**Key words:** Impedance Tube; Acoustics; Soundproofing; Transmission Loss; Transfer Matrix.

## LISTA DE TABELAS

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Dimensões do prensa cabo.....                    | 29 |
| Tabela 2 – Dados da fonte de entrada.....                   | 31 |
| Tabela 3 – Dimensões do tubo.....                           | 33 |
| Tabela 4 – Componentes .....                                | 34 |
| Tabela 5 – Listagem de componentes de <i>Hardware</i> ..... | 42 |
| Tabela 6 – Configurações de Medição e Procedimentos.....    | 45 |



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Representação de uma onda harmônica senoidal. ....                   | 17 |
| Figura 2 – Representação de propagação de onda a) plana b) esférica.....        | 18 |
| Figura 3 – Energias sobre uma amostra. ....                                     | 20 |
| Figura 4 – Representação de uma função de transferência.....                    | 22 |
| Figura 5 – Diâmetro do tubo.....                                                | 25 |
| Figura 6 – Comprimento das metades do tubo. ....                                | 26 |
| Figura 7 – Desenho técnico do CAP de PVC.....                                   | 27 |
| Figura 8 – Dimensionamento completo do tubo (vista frontal e superior). ....    | 28 |
| Figura 9 – Renderização do corpo do tubo. ....                                  | 28 |
| Figura 10 – Desenho técnico do prensa-cabo.....                                 | 29 |
| Figura 11 – Desenho técnico da luva .....                                       | 30 |
| Figura 12 – Desenho técnico suporte do tubo.....                                | 32 |
| Figura 13 – Montagem completa do aparelho. ....                                 | 33 |
| Figura 14 – Tubos de PVC utilizados na montagem do corpo do aparelho. ....      | 34 |
| Figura 15 – Furações para comportar o microfone de medição. ....                | 35 |
| Figura 16 – Corpo do tubo e detalhamento.....                                   | 35 |
| Figura 17 – Suporte do corpo do aparelho.....                                   | 36 |
| Figura 18 – Montagem completa do tubo.....                                      | 36 |
| Figura 19- Medição da função de transferência. ....                             | 37 |
| Figura 20 – Microfone e fonte de alimentação do microfone.....                  | 42 |
| Figura 21 – Amplificador de potência e conversor AD/DA .....                    | 43 |
| Figura 22 – Caixa acústica de Busulo (2012).....                                | 43 |
| Figura 23 – Interface inicial do ITA-toolbox. ....                              | 44 |
| Figura 24 – Janela de obtenção de função de transferência.....                  | 44 |
| Figura 25 – Amostras de madeira e alumínio.....                                 | 46 |
| Figura 26 – Gráfico de TL x f para tubo vazio. ....                             | 47 |
| Figura 27 – Detalhe da faixa de frequência de interesse. ....                   | 48 |
| Figura 28 – Amostras de espuma fornecidas .....                                 | 48 |
| Figura 29 – Gráfico de TL x f das amostras de espuma fornecidas pela PUC-PR.... | 49 |
| Figura 30 – Gráfico de TL x f medido no tubo de fabricação própria.....         | 49 |
| Figura 31 – Comparação entre resultados de TL.....                              | 50 |
| Figura 32 – Gráfico de TL x f de amostra de madeira .....                       | 50 |
| Figura 33 – Reta ajustada para a madeira .....                                  | 51 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 34 – Comparação entre curva ajustada e curva teórica para madeira ..... | 51 |
| Figura 35 – Gráfico de TLxf de amostra de Alumínio .....                       | 52 |
| Figura 36 – Reta ajustada para a alumínio .....                                | 52 |
| Figura 37 – Comparação entre métodos de análise para amostra de aço. ....      | 53 |

## SUMÁRIO

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                      | <b>13</b> |
| 1.1. CONTEXTO .....                                            | 13        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....   | <b>15</b> |
| 2.1 PROPRIEDADES DO SOM .....                                  | 15        |
| 2.1.1 Pressão sonora .....                                     | 15        |
| 2.1.2 Nível de pressão sonora .....                            | 15        |
| 2.1.3 Intensidade sonora .....                                 | 16        |
| 2.1.4 Características de uma onda sonora .....                 | 16        |
| 2.2 PROPAGAÇÃO SONORA .....                                    | 17        |
| 2.3 COMPORTAMENTO SONORO EM DUTOS .....                        | 18        |
| 2.4 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA .....                                  | 19        |
| 2.5 REFLEXÃO, ABSORÇÃO E TRANSMISSÃO .....                     | 20        |
| 2.6 TRANSMISSÃO E FATOR DE TRANSMISSÃO .....                   | 21        |
| 2.7 COEFICIENTE DE PERDA DE TRANSMISSÃO PARA INCIDÊNCIA NORMAL | 21        |
| 2.8 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA .....                              | 22        |
| 2.9 LEI DA MASSA .....                                         | 23        |
| <b>3 DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO</b> .....                    | <b>24</b> |
| 3.1 DIMENSIONAMENTO .....                                      | 24        |
| 3.1.1 Corpo do tubo .....                                      | 24        |
| 3.1.2 Microfone .....                                          | 27        |
| 3.1.3 Porta amostra .....                                      | 30        |
| 3.1.4 Fonte sonora .....                                       | 30        |
| 3.1.5 Componentes adicionais .....                             | 31        |
| 3.1.6 Faixa de frequência de operação .....                    | 32        |
| 3.1.7 Resumo e Montagem completa .....                         | 33        |
| 3.2 CONSTRUÇÃO DO APARELHO .....                               | 34        |
| <b>4 MÉTODO DE ANÁLISE</b> .....                               | <b>37</b> |
| 4.1 MÉTODO DA MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA .....                    | 38        |
| 4.1.1 Método de duas cargas .....                              | 39        |
| 4.1.2 Método de carga única .....                              | 41        |
| 4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS .....                                   | 42        |
| 4.3.1 Hardware .....                                           | 42        |
| 4.3.2 Software .....                                           | 43        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                         | <b>46</b> |
| 5.1 TUBO VAZIO .....                                           | 47        |
| 5.2 AMOSTRAS DE ESPUMA .....                                   | 48        |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| 5.3 AMOSTRA DE MADEIRA .....     | 50        |
| 5.4 AMOSTRA DE ALUMÍNIO .....    | 52        |
| 5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS ..... | 53        |
| <b>6 CONCLUSÃO .....</b>         | <b>55</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>          | <b>57</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTO

Devido ao constante aumento na concentração populacional em regiões urbanas, os níveis sonoros vêm crescendo de maneira análoga, causando quantidades significativas de poluição sonora. Altos níveis de ruído podem prejudicar a qualidade de vida e saúde humana, sendo considerada pela Organização Mundial de Saúde (World Health Organization, 2018) o terceiro maior fator de poluição, ficando atrás apenas do ar, e da água.

Já é evidenciado de que a exposição a níveis excessivos de ruído pode afetar funções cognitivas, possui efeitos sobre a motivação, stress, e pressão sanguínea. (World Health Organization, 2018). De um outro ponto de vista, o conforto, e o isolamento sonoro, também é importante em produtos tais como trens, veículos automotores, embarcações e aeronaves.

Uma medida que pode ser tomada para atuar na redução dos níveis de ruído de uma forma geral é o uso de materiais de isolamento que tenham um bom desempenho acústico. Esses materiais têm como objetivo atenuar a passagem de som ou ruído de um ambiente para suas vizinhanças.

Além disso, o conhecimento e a possibilidade de analisar características acústicas, como impedância e transmissibilidade, torna possível a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais, bem como a realização de projetos acústicos dos mais diversos. A Impedância Sonora é um dado de entrada para simulações através do método dos elementos finitos ou do método dos elementos de contorno. Coeficiente de Absorção é dado de entrada para simulações através de métodos "geométricos", tais como o traçado de raios, fontes virtuais ou radiosidade. Dentro desses cenários, um dos métodos utilizados para determinação desses parâmetros é a utilização de um Tubo de Impedância, mesmo com a limitação de que tais propriedades são obtidas apenas para a incidência sonora normal à superfície.

A fim de atenuar a transmissibilidade de ruídos em ambientes, se faz necessária a realização de um ensaio para determinação das características de isolamento de materiais. Existem alguns métodos de ensaio e levantamento de dados para essas características; o abordado neste trabalho é o Tubo de Impedância.

Segundo BRANDÃO (2016) as principais vantagens em se utilizar o Tubo de Impedância são:

- Complexidade matemática relativamente baixa;
- Permite a medição de uma grandeza complexa (impedância);
- Ter sido extensivamente usado ao longo do tempo, tornando-se referência e um procedimento normatizado, sendo abordado pela ISO e ASTM.

Visto que atualmente não existe nenhum equipamento do tipo Tubo de Impedância para quantificar o isolamento acústico de materiais na UTFPR *Campus* Curitiba, este projeto tem como objetivo realizar e relatar os processos de construção do aparato, tendo um foco em produzir um equipamento de custo reduzido, e posteriores testes para validação das medições de propriedades acústicas. Esse processo será realizado em algumas etapas, que vão desde a pesquisa bibliográfica sobre o tema, projeto e dimensionamento, seleção de materiais, até a manufatura e análise dos dados obtidos.

Portanto, com a finalização deste projeto e sua validação, será possível avaliar as seguintes características:

- Coeficiente de transmissão;
- Perda de transmissão;
- Coeficiente de absorção;
- Coeficiente de reflexão;
- Impedância acústica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção do trabalho é dedicada a expor e descrever de maneira breve alguns conceitos do campo da acústica que são necessários para o desenvolvimento do projeto.

### 2.1 PROPRIEDADES DO SOM

O som é um fenômeno compressional oscilatório, que se propaga em um material na forma de ondas mecânicas, essencialmente na direção longitudinal em fluidos, enquanto em meios sólidos podem ser longitudinais, transversais ou de torção, e sua velocidade de propagação depende das características do meio (BISTAFA, 2011).

Em meios fluidos, ocorre uma reação por parte do fluido contra a mudança em seu volume, causando uma mudança de pressão (JACOBSEN, 2013).

#### 2.1.1 Pressão sonora

É a variação de pressão gerada pela onda sonora em um ponto, quantificada em Pascal (Pa). A variação de pressão de mais baixa grandeza detectável pelo sistema auditivo humano é na ordem de  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa (BISTAFA, 2011).

#### 2.1.2 Nível de pressão sonora

O sistema auditivo humano pode registrar variações de pressão sonora em um espectro muito grande, por isso a pressão costuma ser medida em uma escala logarítmica. Além disso, a impressão subjetiva do quão "alto" um som está se correlaciona melhor com uma escala logarítmica. A unidade de medida é o decibel dB, que é uma relação com uma pressão de referência. Essa relação é chamada de "nível sonoro" (JACOBSEN, 2013). O nível de pressão sonora é definido como:

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right) \quad (1)$$

onde:

|                        |                                                             |
|------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $L_p$                  | nível de pressão sonora;                                    |
| $p_{ref}$              | pressão de referência, 20 $\mu$ Pa para o ar;               |
| $p_{rms} = p/\sqrt{2}$ | pressão eficaz / raiz do valor quadrático médio da pressão. |

### 2.1.3 Intensidade sonora

A intensidade sonora ( $I$ ) é definida como a quantidade média de energia, na unidade de tempo, que atravessa uma área unitária perpendicular à direção da propagação da onda (BISTAFA, 2011). Para uma onda esférica seu valor é:

$$I_r = \frac{\left( \frac{A}{r} \right)^2}{\rho c} \quad (2)$$

onde:

|        |                                               |
|--------|-----------------------------------------------|
| $r$    | distância da fonte sonora;                    |
| $A/r$  | amplitude da pressão sonora à distância $r$ ; |
| $c$    | velocidade do som;                            |
| $\rho$ | densidade do meio.                            |

### 2.1.4 Características de uma onda sonora

Ondas são caracterizadas por alguns parâmetros como:

- Período ( $T$ ): Intervalo que a onda leva para completar um ciclo.
- Frequência ( $f$ ): Inverso do período, é o número de oscilações que ocorrem em um intervalo de tempo.
- Amplitude ( $A$ ): Valor máximo de pressão que é atingido na onda dentro de um intervalo de período, podendo assumir valores tanto positivos, quanto negativos.
- Comprimento de onda ( $\lambda$ ): Distância medida entre um valor de pico e outro.
- Número de onda ( $k$ ): Representa a quantidade de ondas por unidade de distância.



As grandezas de frequência e comprimento de onda são relacionadas com a velocidade ( $c$ ) no som no meio através da seguinte expressão (HALLIDAY, 2016):

$$c = \lambda \cdot f \quad (3)$$

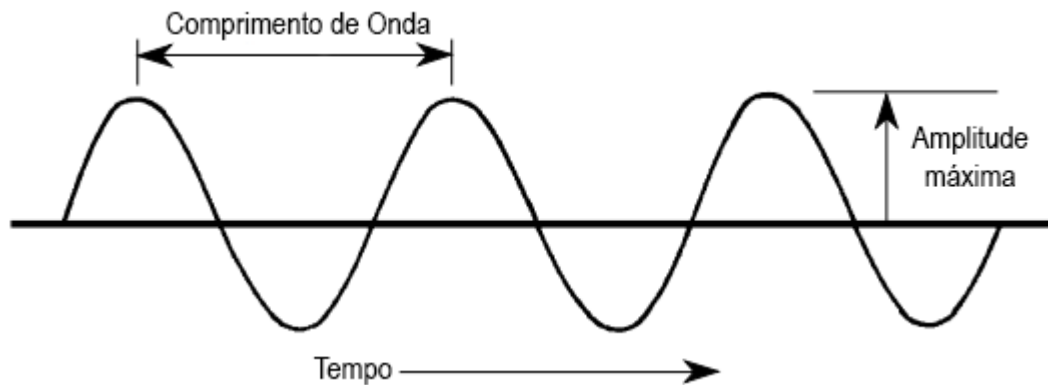


Figura 1 – Representação de uma onda harmônica senoidal.

Fonte: Everest, 2011.

## 2.2 PROPAGAÇÃO SONORA

No meio, as ondas sonoras podem se propagar de duas maneiras, na forma de onda plana, e na forma de onda esférica. O modelo mais aproximado para descrever a propagação do som em um meio, é o de ondas esféricas (BISTAFRA, 2011). O modelo de geração dessas ondas é uma esfera pulsante com frequência angular ( $\omega$ ) igual a:

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

Ondas planas ocorrem apenas em casos bastante específicos, sendo um desses casos, a propagação em dutos que possuem diâmetro menor do que o comprimento de onda do som nele propagado. O que torna esse tipo de modelagem adequada em análises através de um Tubo de Impedância (KUTRUFF, 2009).

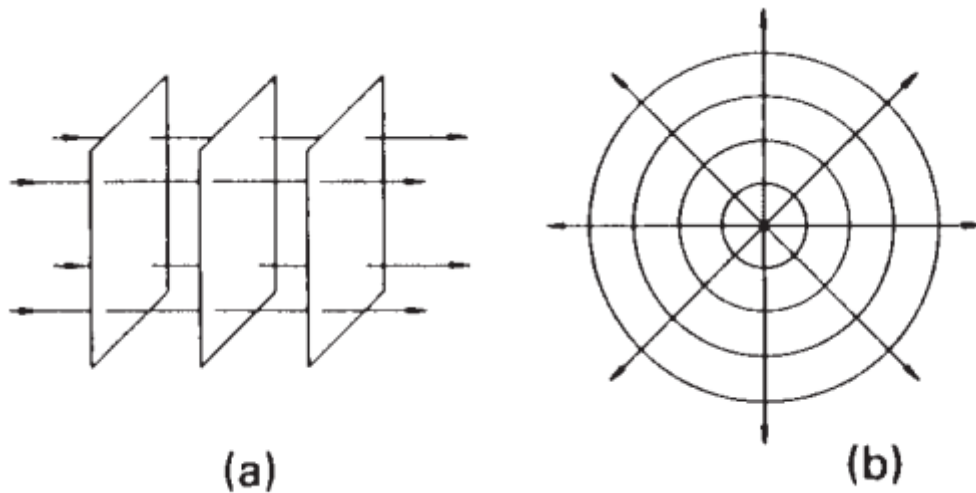


Figura 2 – Representação de propagação de onda a) plana b) esférica.

Fonte: Kuttruff, 2009.

### 2.3 COMPORTAMENTO SONORO EM DUTOS

A acústica de dutos se preocupa em analisar a propagação do som em tubos, tendo variadas aplicações práticas. Uma dessas aplicações é o uso de tubos de impedância para a análise de propriedades acústicas de materiais.

Para análise em um Tubo de Impedância assume-se que a onda depende apenas do tempo e da propagação em uma única direção, adotada como  $x$ , e que a pressão sonora tem valor uniforme em uma dada seção perpendicular à direção de propagação da onda em um determinado tempo e posição. A onda sonora é modelada matematicamente através de:

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

onde  $p$  é a pressão sonora.

Uma das formas de representar ondas sonoras no espaço e no tempo é através de funções harmônicas. Uma das soluções para a Equação 5 em tubos e dutos de seção transversal constante para uma onda incidente com partes refletidas é (MUNJAL, 1987 apud TERASHIMA, 2016):

$$p(x,t) = Ae^{i(\omega t - kx)} + Be^{i(\omega t + kx)} \quad (6)$$

onde:

|                 |                                                      |
|-----------------|------------------------------------------------------|
| A               | amplitude da onda incidente;                         |
| B               | amplitude da onda refletida;                         |
| i               | unidade imaginária;                                  |
| $\omega=2\pi f$ | frequência angular;                                  |
| $k=\omega/c$    | número de onda;                                      |
| x               | direção de propagação da onda de propagação da onda. |

## 2.4 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA

Impedância acústica está associada com as propriedades do meio ou material, e pode ser usada em casos onde a pressão sonora incidente em uma superfície é aproximadamente constante (BISTAFA, 2011). De maneira simplificada, a Impedância Acústica indica a dificuldade que o meio oferece à propagação das ondas sonoras, sendo separada em Impedância Acústica e Impedância Específica. A primeira é representada matematicamente por (BISTAFA, 2011; KUTRUFF, 2009):

$$Z_a = P/q \quad (7)$$

em que:

$$q = S \cdot u \quad (8)$$

onde:

|   |                                               |
|---|-----------------------------------------------|
| p | pressão sonora média;                         |
| S | área transversal;                             |
| u | componente normal da velocidade da partícula; |
| q | velocidade de volume.                         |

A velocidade de volume é a grandeza que quantifica o fluxo volumétrico por unidade de tempo.

Já a Impedância Específica ( $Z_m$ ) é representada matematicamente por:

$$Z_m = Z_a \cdot S \quad (9)$$

## 2.5 REFLEXÃO, ABSORÇÃO E TRANSMISSÃO

Quando o som incide sobre uma superfície, alguns fenômenos ocorrem. Da energia que incide sobre o material, uma parcela é refletida, outra é dissipada pelo material e parte é transmitida através da superfície. Esses fenômenos podem ser visualizados na Figura 3 a seguir:

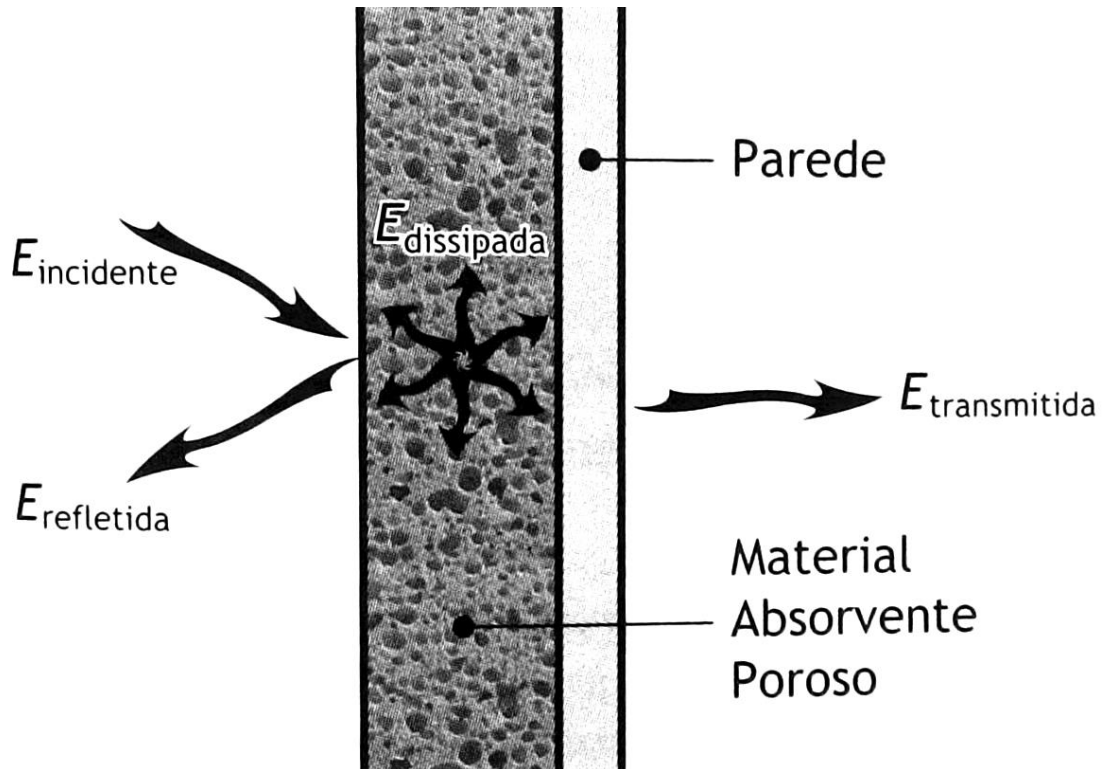


Figura 3 – Energias sobre uma amostra.

Fonte: BISTAFA, 2011.

O coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) é a medida da capacidade que uma superfície tem de absorver ondas sonoras (BISTAFA, 2011). Ele pode ser definido da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} = \frac{E_{\text{incidente}} - E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (10)$$

onde:

- $\alpha$  coeficiente de absorção sonora;
- $E_{\text{absorvida}}$  parcela da energia que é absorvida;
- $E_{\text{incidente}}$  energia que incide na superfície;
- $E_{\text{refletida}}$  parcela da energia que é refletida pela superfície.

O coeficiente de reflexão sonora ( $\rho$ ) é definido por:

$$\rho = \frac{E_{refletida}}{E_{incidente}} \quad (11)$$

Das duas definições advém a relação:

$$\alpha = 1 - \rho \quad (12)$$

Assim,  $\alpha=1$  ( $\rho=0$ ) indica uma superfície completamente absorvente, enquanto  $\rho=1$  ( $\alpha=0$ ) representa uma superfície completamente reflexiva.

## 2.6 TRANSMISSÃO E FATOR DE TRANSMISSÃO

Na Figura 3, é possível perceber que uma parcela da energia sonora que incide na superfície é transmitida pela face oposta. A relação da energia transmitida com a energia incidente é chamada de coeficiente de transmissão sonora ( $\tau$ ) e é definido da seguinte forma:

$$\tau = \frac{E_{transmitida}}{E_{incidente}} \quad (13)$$

O coeficiente de transmissão sonora é utilizado para o cálculo do coeficiente de perda de transmissão, que está apresentado na seção 2.7.

## 2.7 COEFICIENTE DE PERDA DE TRANSMISSÃO PARA INCIDÊNCIA NORMAL

O coeficiente de transmissão sonora ( $\tau$ ) pode ser interpretado como uma razão de potências entre as duas faces da amostra analisada. Entretanto, essa forma de interpretação não é de fácil visualização, fazendo do coeficiente de perda de transmissão uma grandeza útil, que, sendo medida em dB, pode ser obtida de forma direta (RAO, 2014).

Segunda a norma E2611-09 da ASTM (2009) a perda de transmissão em um tubo, considerando incidência normal de ondas planas, pode ser calculada através da Equação 14.

$$TL = -20 \log |\tau| \quad (14)$$

Dessa definição, podemos notar que quanto menor for o valor do coeficiente de transmissão, maior será a perda de transmissão, ou seja, a amostra analisada é mais isolante (JUNG et al. 2008).

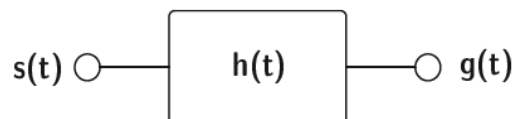
Esse parâmetro está atrelado ao material em si, mas também é fortemente dependente das condições de contorno inerentes ao método e da maneira que o sistema foi montado. Isso deve ser levado em conta na interpretação dos resultados obtidos pelos métodos de análise que serão descritos posteriormente (ASTM E2611 – 09, 2009).

## 2.8 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Um sistema linear invariante no tempo analisado, ao ser excitado por uma função  $s(t)$ , gera uma função de saída denominada  $g(t)$ , e a resposta ao impulso desse sistema é chamada de  $h(t)$ . Esse sistema linear invariante no tempo pode ser representado pela integral de convolução da Equação 15:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(t - \tau)d\tau = s(t) * h(t) \quad (15)$$

Essa integral de convolução pode ser representada de maneira gráfica através do sistema da Figura 4.



**Figura 4 – Representação de uma função de transferência.**

**Fonte: Vorländer, 2008.**

Para fazer a análise do sistema no domínio da frequência, podemos aplicar uma transformada de Fourier na Equação 15, fazendo a operação de convolução se transformar na multiplicação da Equação 16 (VORLÄNDER, 2008):

$$\begin{aligned} F\{g(t)\} &= F\{s(t) * h(t)\} \\ F\{g(t)\} &= F\{s(t)\} * F\{h(t)\} \\ G(f) &= S(f) \cdot H(f) \\ H(f) &= \frac{G(f)}{S(f)} \end{aligned} \quad (16)$$

## 2.9 LEI DA MASSA

Para frequências maiores que a primeira frequência ressonante, os valores de TL são governados pela massa da amostra e é independente da sua rigidez. Nessa região uma parcela da energia acústica é transmitida pelo material e o restante é refletido pela sua superfície (BARRON, 2001).

Ainda de acordo com Barron (2001), essa região é chamada de Lei da Massa e é regida pela equação:

$$TL_n = 10 \log \left( 1 + \left( \frac{\pi f \rho_w d}{\rho_0 c} \right)^2 \right) \quad (17)$$

onde:

- TL<sub>n</sub> perda de transmissão normal teórica;
- ρ<sub>w</sub> densidade do material;
- d espessura da amostra;
- f frequência;
- c velocidade do ar;
- ρ<sub>0</sub> densidade do ar.

### 3 DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO

Nessa seção serão descritos todos os procedimentos da etapa de projeto e dimensionamento do tubo, cálculo de todos os parâmetros e variáveis necessários, e procedimentos de construção do aparelho. Todos os métodos empregados tomam como base as considerações e recomendações da norma ASTM E-2611-09.

#### 3.1 DIMENSIONAMENTO

Nessa seção do trabalho serão expostos todos os parâmetros de construção do tubo de impedância, bem como o dimensionamento dos componentes e escolha de materiais.

##### 3.1.1 Corpo do tubo

O corpo do tubo pode ter seção transversal retangular ou circular, que deve ser constante ao longo de toda sua extensão. O corpo não deve apresentar nenhum tipo de curvatura, com uma superfície interna possuindo bom acabamento, e estar livre de qualquer material que possa causar atenuação sonora. As paredes do corpo do tubo devem ser suficientemente espessas para que o som do exterior não tenha influência significativa sobre a amostra analisada.

Visando o conceito de custo reduzido, para esse projeto será adotado como material o PVC, e o corpo possuirá seção circular.

##### 3.1.1.1 Diâmetro do tubo

O diâmetro do tubo será um dado de entrada no projeto. Essa variável se relaciona unicamente com o limite de frequência superior que o tubo será capaz de analisar com precisão, e a interação dessas duas variáveis se dá na forma:

$$d < \frac{K_c}{f_u} \quad (18)$$

onde:

d      diâmetro do tubo;

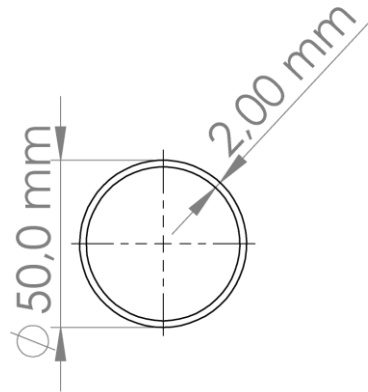


c      velocidade do som;  
 K      constante que dependente da geometria, para seções circulares assume o valor de 0,586.

Essa relação do diâmetro com a frequência superior ( $f_u$ ), garante que haverá propagação de ondas planas no interior do tubo.

Através de uma análise de benchmark com Tubos de Impedância vendidos comercialmente, estipulou-se que um limite de frequência superior adequado estaria entre 4000 Hz e 5000 Hz, cruzando essa informação com os diâmetros de tubos PVC encontrados no mercado, foi determinado o diâmetro de:

$$d = 50 \text{ mm}$$



**Figura 5 – Diâmetro do tubo.**

**Fonte: Autoria própria.**

Retornando então à Equação 18 podemos calcular o limite superior de fato:

$$f_u = \frac{K_c}{d} = \frac{0,586 \cdot 343}{0,050} = 4369 \text{ Hz} \quad (19)$$

### 3.1.1.2 Comprimento do corpo do tubo

De maneira geral, o tubo deve ser longo o suficiente para que haja geração de ondas planas antes da posição do primeiro microfone, e deve ser capaz de comportar todos os microfones, além disso, deve haver um espaçamento mínimo entre a fonte sonora, e o primeiro microfone, equivalente a pelo menos 3 vezes o diâmetro do tubo.

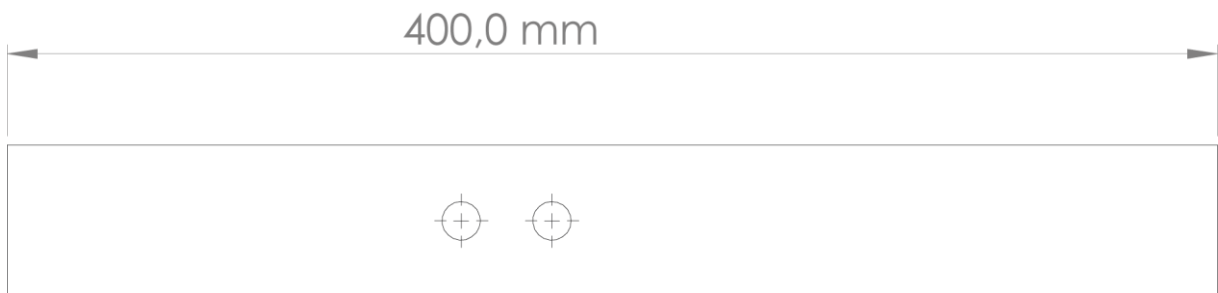
Todos esses parâmetros devem respeitar o dimensionamento descrito nas seções 3.1.2.2 e 3.1.2.3.

$$L_1 = L_2 = 40\text{cm} \quad (20)$$

onde:

L1 comprimento da metade anterior a amostra;

L2 comprimento da metade posterior a amostra.



**Figura 6 – Comprimento das metades do tubo.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.1.1.3 Terminação do tubo

Uma das terminações do tubo deve ser ao menos minimamente anecóica, causando menor reflexão sonora dentro do aparelho, e a outra deve ser reflexiva.

Para o projeto determinou-se que um “cap” de PVC seria adequado para utilização como terminação reflexiva do tubo, com tamanho coerente à bitola de 50mm. Para a terminação anecóica foi utilizado um tarugo de espuma porosa (alta absorção), com o final do tubo aberto.

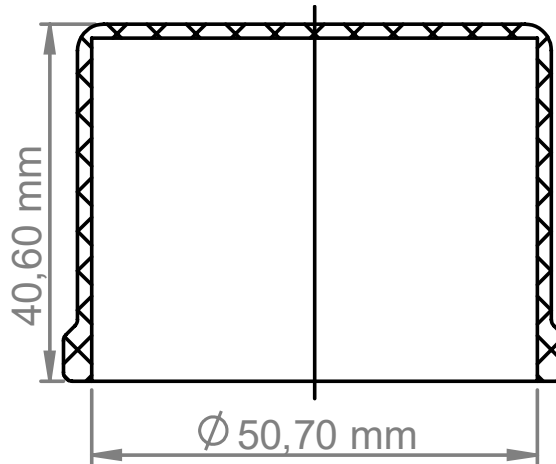


Figura 7 – Desenho técnico do CAP de PVC.

Fonte: Autoria própria.

### 3.1.2 Microfone

#### 3.1.2.1 Tipo e diâmetro

Têm-se como recomendação que o diâmetro dos microfones seja menor do que 20% do comprimento de onda relacionado à maior frequência desejada.

$$dm < 0,2 \cdot \frac{341}{4369,52} = 0,0156 \quad (21)$$

O diâmetro do microfone utilizado durante as medições é de 12,7 mm, portanto atende ao requisito da Equação 21.

#### 3.1.2.2 Espaçamento

O espaçamento entre os microfones deve ser grande, a fim de aumentar a precisão dos testes, porém, deve ser menor que metade do menor comprimento de onda analisado no tubo. O maior espaçamento entre os microfones não deve ultrapassar 80% do valor de  $c/2f_u$ .

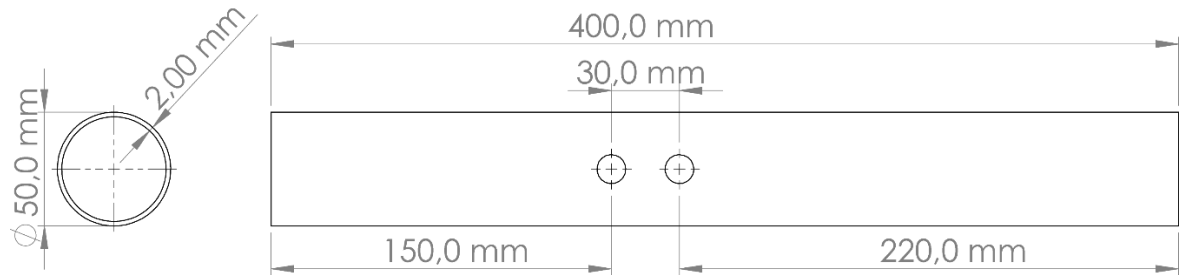
De acordo com esses critérios, o valor máximo de espaçamento entre os microfones será:

$$s_{max} = 0,8 \cdot \frac{c}{2 \cdot f_u} = 0,8 \cdot \frac{343}{2 \cdot 44369,52} = 0,0314[m] = 31,4[mm] \quad (22)$$

Analisando a princípio um valor de frequência inferior igual a 400 Hz, o valor mínimo de espaçamento entre os microfones será:

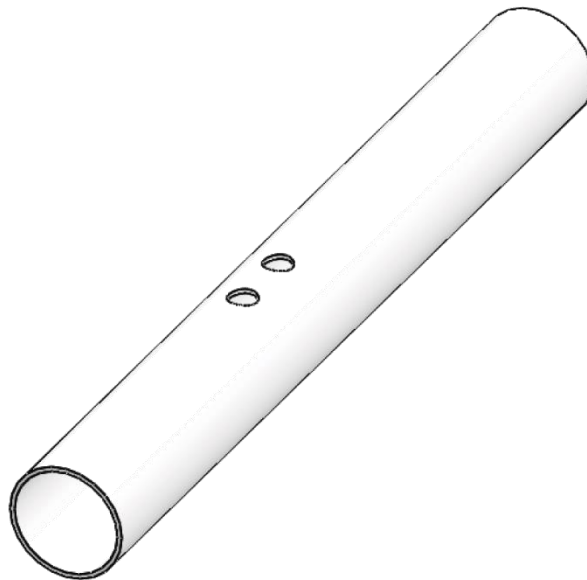
$$s_{min} = 0,01 \cdot \frac{c}{f_1} = 0,01 \cdot \frac{343}{400} = 0,0085[m] = 8,5[mm] \quad (23)$$

Devido a fatores de fabricação, o valor escolhido foi de 30 mm para o espaçamento entre os microfones.



**Figura 8 – Dimensionamento completo do tubo (vista frontal e superior).**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 9 – Renderização do corpo do tubo.**

Fonte: Autoria própria.

### 3.1.2.3 Montagem dos microfones

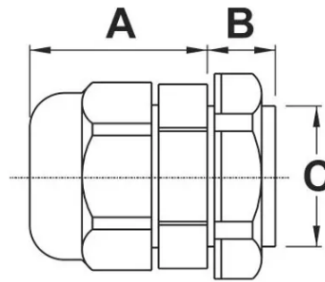
Deve-se manter uma distância mínima entre o microfone e a amostra. Considerando que as amostras a serem analisadas tenham superfícies planas, a distância dos microfones localizados próximos a ela deve ser de no mínimo duas vezes o diâmetro do tubo, portanto:

$$l_1 = l_2 > 2 \cdot 50 = 100 \text{ [mm]} \quad (24)$$

Para o projeto adotou-se o valor de 150 mm para esse parâmetro.

A solução encontrada para fixação dos microfones foi a utilização de prensa-cabos de tamanho PG11, capazes de comportarem o diâmetro do microfone a ser utilizado no aparelho. Com a utilização desse componente, é possível fazer um ajuste mais preciso da altura do microfone, dando a oportunidade de garantir que a face do microfone esteja tangente à face interna do tubo, não gerando interferência nas ondas produzidas pela fonte sonora.

Como método de fixação dos prensa cabos no corpo do tubo, foi utilizada cianoacrilato para PVC, juntamente com silicone, para vedar possíveis frestas remanescentes da fixação no corpo.



**Figura 10 – Desenho técnico do prensa-cabo.**

Fonte: Catálogo Steck.

**Tabela 1 – Dimensões do prensa cabo.**

| Dimensões |      |       |
|-----------|------|-------|
| A         | B    | C     |
| 24 mm     | 8 mm | 18 mm |

Fonte: Catálogo Steck.

### 3.1.3 Porta amostra

O componente utilizado para fixação da amostra foi uma luva para tubos de PVC, compatível com o diâmetro dimensionado. Dessa maneira tem-se a facilidade de alocar a amostra de maneira correta, garantindo todas as condições necessárias de não esmagamento da amostra e assegurando que sua superfície permaneça plana.

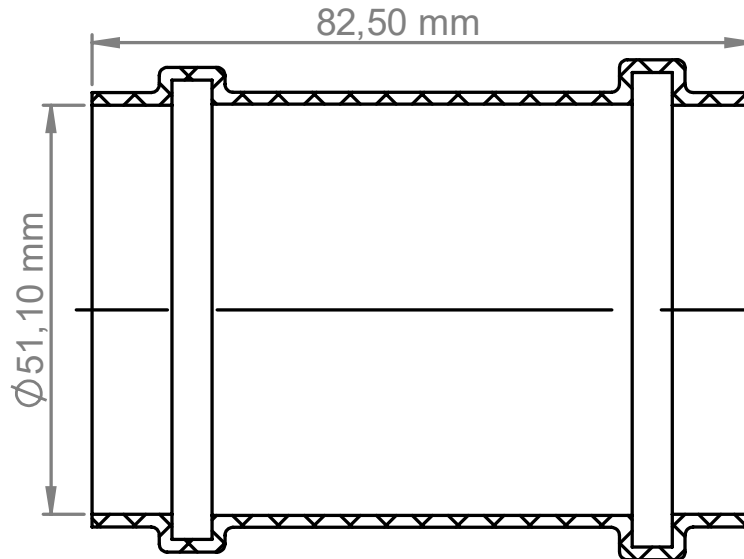


Figura 11 – Desenho técnico da luva

Fonte: Autoria própria.

### 3.1.4 Fonte sonora

A fonte sonora deve providenciar uma resposta uniforme em toda faixa de frequência que o tubo vai suportar. Deve ser isolada do tubo com a finalidade de minimizar a excitação vibratória no corpo do tubo.

Tabela 2 – Dados da fonte de entrada.

|                                                 |                |
|-------------------------------------------------|----------------|
| <b>Potência nominal</b>                         | 50W Rms        |
| <b>Impedância</b>                               | 4 Ohms         |
| <b>Resposta de frequência</b>                   | 70 Hz a 20 KHz |
| <b>Freq. De ressonância (Fs)</b>                | 70 Hz          |
| <b>SPL</b>                                      | 89 dB/W.m      |
| <b>Fator de qualidade total do alto-falante</b> | 0,96           |
| <b>Fator de qualidade elétrico</b>              | 1,3            |
| <b>Fator de qualidade mecânico</b>              | 3,8            |
| <b>Volume equivalente do alto-falante (Vas)</b> | 9              |
| <b>Descolamento máximo do cone (Xmax)</b>       | 1,5            |
| <b>Área efetiva do cone (Sd)</b>                | 95             |
| <b>Volume máximo deslocado (Vd)</b>             | 14,2           |

Fonte: BUSULO, 2017.

### 3.1.5 Componentes adicionais

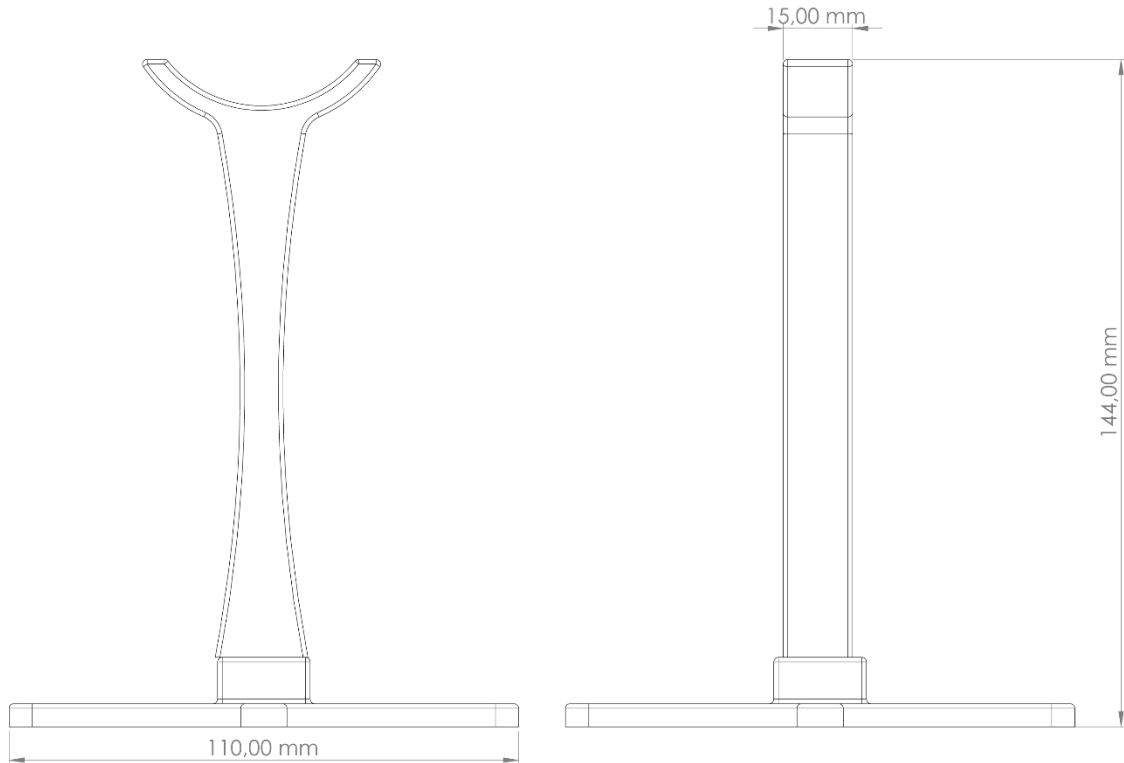
Além dos componentes já citados nas seções anteriores, ainda foi necessária a utilização de algumas peças extras relacionadas a montagem do tubo.

#### a) Microfones “falsos”

Como o objetivo do desenvolvimento do trabalho é a utilização de apenas um microfone, as outras posições de alocação não podem ficar vazias durante as medições de propriedade de uma amostra, para solucionar esse problema, utilizou-se um objeto com as mesmas dimensões do microfone de medição, impresso em 3D, em material PLA, para preencher as outras 3 cavidades vazias no tubo durante as medições.

#### b) Suporte do tubo

É necessário deixar o corpo do tubo concêntrico à fonte sonora, para isso foi desenvolvido um suporte para o tubo, a fim de deixar o centro do corpo do tubo alinhado com o centro do alto-falante da fonte sonora.



**Figura 12 – Desenho técnico suporte do tubo.**

**Fonte: Autoria própria.**

### **c) Fixação e acabamento**

Para fixação dos prensa-cabos no corpo do tubo foram utilizados materiais como cianoacrilato e silicone para auxílio na vedação. Também para acabamento visual, foi utilizada tinta preta com acabamento fosco.

#### **3.1.6 Faixa de frequência de operação**

A faixa de frequência de operação do tubo depende de parâmetros geométricos ligados ao corpo do tubo, é dada por:

$$f_1 < f < f_u \quad (25)$$

onde:

- f frequência de operação, em Hz;
- $f_1$  limite de frequência inferior, em Hz;
- $f_u$  limite de frequência superior, em Hz.



Conforme seção 3.1.1.1, a frequência superior de operação calculada foi de 4369,52 Hz, para efeito de análise computacional, esse valor foi definido em 4300 Hz. Em relação a frequência inferior, considerou-se como dado de entrada, assumindo valor de 400 Hz, portanto a faixa de análise do tubo é:

$$400 \text{ [Hz]} < f < 4300 \text{ [Hz]} \quad (26)$$

### 3.1.7 Resumo e Montagem completa

A Tabela 3 apresenta um resumo das dimensões do tubo.

**Tabela 3 – Dimensões do tubo.**

| Diâmetro 'd' | Distância fonte-microfone | Distância entre microfones | Distância microfone-amostra | Comprimento de cada tubo | Comprimento total do aparelho |
|--------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 50 mm        | 220 mm                    | 30 mm                      | 150 mm                      | 400 mm                   | 800 mm                        |

Fonte: Autoria própria.

A Figura 13 mostra uma renderização da montagem do tubo, a partir de todas as peças dimensionadas e projetadas.



**Figura 13 – Montagem completa do aparelho.**

Fonte: Autoria própria.

### 3.2 CONSTRUÇÃO DO APARELHO

A Tabela 4 mostra a relação de materiais e componentes necessários para início da construção do aparelho.

**Tabela 4 – Componentes**

| Identificação | Componente                                       | Qtd. |
|---------------|--------------------------------------------------|------|
| 1             | Tubo PVC 50mm de diâmetro com 3m de comprimento. | 1    |
| 2             | Luva para tubo 50mm.                             | 1    |
| 3             | CAP em PVC para tubo 50mm.                       | 1    |
| 4             | Prensa-cabo tamanho PG11.                        | 4    |
| 5             | Tubo de cianoacrilato.                           | 1    |
| 6             | Lata spray de tinta - Preto fosco.               | 1    |
| 7             | Silicone.                                        | 1    |
| 8             | Espuma porosa para terminação                    | 1    |

Fonte: Autoria própria.

A montagem foi iniciada pelo corpo do tubo, cortando-o nas dimensões de projeto, e fazendo as devidas furações para comportar os microfones durante as medições.



**Figura 14 – Tubos de PVC utilizados na montagem do corpo do aparelho.**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 15 – Furações para comportar o microfone de medição.**

**Fonte: Autoria própria.**

Com as furações feitas, foram fixados os prensa-cabos, utilizando cianoacrilato e silicone, além de realizada pintura dos componentes.



**Figura 16 – Corpo do tubo e detalhamento.**

**Fonte: Autoria própria.**

Impressão dos suportes que apoiaram o corpo do aparelho, deixando-o na altura correta para montagem com a caixa acústica.





**Figura 17 – Suporte do corpo do aparelho.**

**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 18 mostra a montagem completa do tubo, acoplado a fonte sonora.



**Figura 18 – Montagem completa do tubo.**

**Fonte: Autoria própria.**

## 4 MÉTODO DE ANÁLISE

O método de análise e medição se baseia no esquema da Figura 19 de um tubo de impedância. Um gerador de sinal emite o sinal que será amplificado, microfones irão captar o sinal recebido em cada uma das posições, esse sinal é transferido para uma mesa de som com analisador de frequência.

Da mesa de som os dados são transferidos para o computador, onde, através de um *toolkit* de *MATLAB* chamado *ITA-Toolbox*, a função de transferência para cada posição de microfone é calculada, e através da função de transferência é possível obter todos os elementos da matriz de transferência, utilizada para caracterizar os parâmetros desejados (ASTM E2611 – 09, 2009).

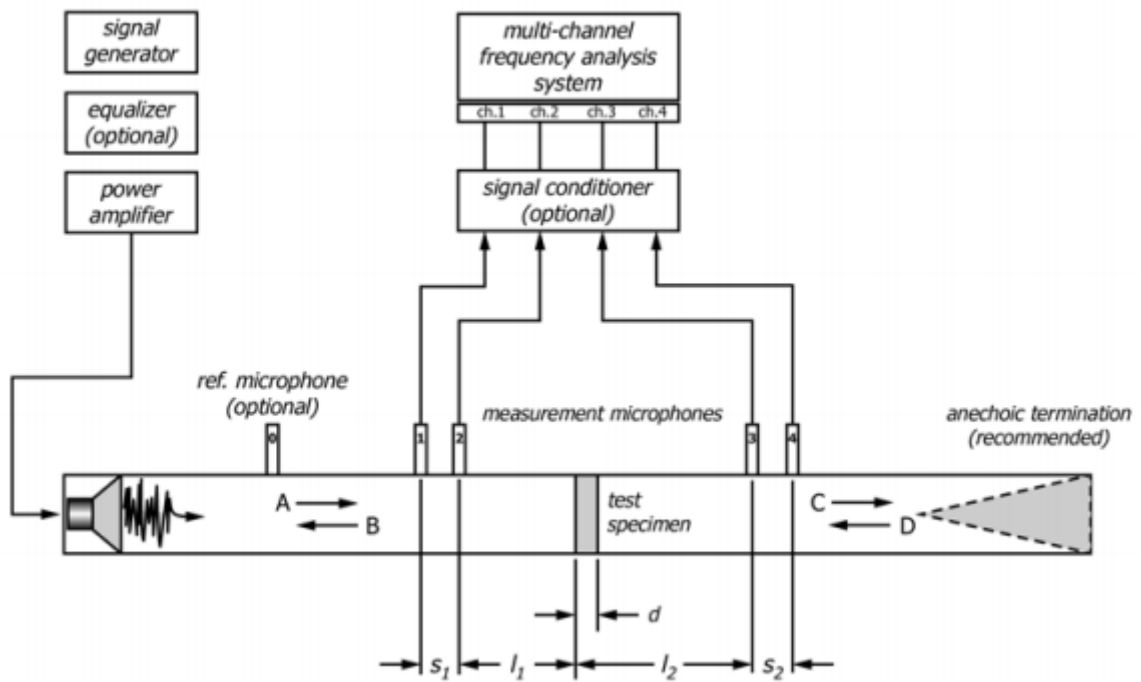


Figura 19- Medição da função de transferência.

Fonte: (ASTM E2611 – 09, 2009).

#### 4.1 MÉTODO DA MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA

Para ondas estacionárias, que são as que ocorrem no tubo de impedância, a pressão sonora na parte anterior e posterior do tubo pode ser calculada com uma simplificação da Equação 6, de tal forma as pressões serão (JUNG et al, 2008):

$$p_{ant} = Ae^{-jkx} + Be^{jkx} \quad (27)$$

$$p_{post} = Ce^{-jkx} + De^{jkx} \quad (28)$$

onde:

- A amplitude da componente incidente na parte anterior à amostra;
- B amplitude da componente refletida na parte anterior à amostra;
- C amplitude da componente transmitida para a parte posterior à amostra;
- D amplitude da componente refletida na parte posterior à amostra;
- k número de onda;
- j unidade imaginária.

Desta forma os valores da pressão sonora para os pontos em  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_4$  serão:

$$\begin{aligned} p_1 &= Ae^{-jkx_1} + Be^{jkx_1} \\ p_2 &= Ae^{-jkx_2} + Be^{jkx_2} \\ p_3 &= Ce^{-jkx_3} + De^{jkx_3} \\ p_4 &= Ce^{-jkx_4} + De^{jkx_4} \end{aligned} \quad (29)$$

Rearranjando as equações para se obter valores para A, B, C e D, tem-se:

$$\begin{aligned} A &= \frac{j(p_1e^{jkx_2} - p_2e^{jkx_1})}{2senk(x_1 - x_2)} \\ B &= \frac{j(p_2e^{jkx_1} - p_1e^{jkx_2})}{2senk(x_1 - x_2)} \\ C &= \frac{j(p_3e^{jkx_4} - p_4e^{jkx_3})}{2senk(x_3 - x_4)} \\ D &= \frac{j(p_4e^{jkx_3} - p_3e^{jkx_4})}{2senk(x_3 - x_4)} \end{aligned} \quad (30)$$

Os coeficientes de A ao D podem ser utilizados para calcular a pressão sonora (P) e a velocidade das partículas (V) dos dois lados da amostra. Esses valores podem ser relacionados entre si por uma matriz de transferência quadrada de ordem dois (YOO & OLIVIERI, 2007):

$$\begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=d} \quad (31)$$

As pressões e velocidades em  $x=0$  e  $x=d$  podem ser expressas através das amplitudes de onda da seguinte forma:

$$\begin{aligned} P|_{x=0} &= A + B \\ V|_{x=0} &= \frac{A - B}{\rho_0 c} \\ P|_{x=d} &= Ce^{-jkd} + De^{jkd} \\ V|_{x=d} &= \frac{Ce^{-jkd} - De^{jkd}}{\rho_0 c} \end{aligned} \quad (32)$$

#### 4.1.1 Método de duas cargas

A partir do sinal captado pelos microfones, o valor da função de transferência no domínio da frequência é obtido utilizando-se do método da deconvolução, isso é feito através do *ITA-Toolbox*, utilizando o ambiente *MATLAB*. Obtendo-se os valores das funções de transferência em cada ponto onde se encontram os microfones, os coeficientes A, B, C e D terão a seguinte forma (ASTM E2611 – 09, 2009):

$$\begin{aligned} A &= \frac{j(H_1 e^{jkx_2} - H_2 e^{jkx_1})}{2 \text{senk}(x_1 - x_2)} \\ B &= \frac{j(H_2 e^{jkx_1} - H_1 e^{jkx_2})}{2 \text{senk}(x_1 - x_2)} \\ C &= \frac{j(H_3 e^{jkx_4} - H_4 e^{jkx_3})}{2 \text{senk}(x_3 - x_4)} \\ D &= \frac{j(H_4 e^{jkx_3} - H_3 e^{jkx_4})}{2 \text{senk}(x_3 - x_4)} \end{aligned} \quad (33)$$

onde:

$H_n$  valor da função de transferência para o ponto n.

Os elementos da matriz de transferência têm relação com propriedades da amostra, sendo de interesse levantá-los. Como a matriz de transferência possui quatro elementos, ou incógnitas, são necessárias quatro equações para determiná-las (YOO & OLIVIERI, 2007).

A Equação 31 representa apenas duas equações lineares. Duas equações adicionais podem ser obtidas após mudar a terminação da parte posterior do tubo. Essa abordagem dá origem ao Método das Duas Cargas. Uma das partes posteriores do tubo será anecóica, ou minimamente reflexiva; a segunda terminação pode ser o tubo bloqueado ou aberto, permitindo reflexão da onda incidente (ASTM E2611 – 09, 2009).

Para esse método, o resultado das duas medições pode ser expresso da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p_a \\ v_a \end{bmatrix}_{x=0} &= \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ v_a \end{bmatrix}_{x=d} \\ \begin{bmatrix} p_b \\ v_b \end{bmatrix}_{x=0} &= \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_b \\ v_b \end{bmatrix}_{x=d} \end{aligned} \quad (34)$$

onde:

p                    pressão acústica;  
v                    velocidade das partículas;  
a e b                representam as duas terminações diferentes;  
0 e d                representam os valores medidos antes e depois da amostra respectivamente.

Os valores de  $P_0$ ,  $P_d$ ,  $V_0$  e  $V_d$  serão, para cada carga:



$$\begin{aligned}
P_0 &= A + B \\
V_0 &= \frac{A - B}{\rho_0 c} \\
P_d &= C e^{-jkd} + D e^{jkd} \\
V_d &= \frac{C e^{-jkd} - D e^{jkd}}{\rho_0 c}
\end{aligned} \tag{35}$$

A matriz de transferência será então:

$$T = \begin{bmatrix} \left( \frac{P_{da} V_{db} - P_{ob} V_{da}}{P_{0a} V_{db} - P_{db} V_{da}} \right) & \left( \frac{P_{0a} P_{db} - P_{ob} P_{da}}{P_{da} V_{db} - P_{db} V_{da}} \right) \\ \left( \frac{V_{da} V_{db} - V_{ob} V_{da}}{P_{da} V_{db} - P_{db} V_{da}} \right) & \left( \frac{P_{da} V_{db} + P_{ob} V_{0a}}{P_{0a} V_{db} - P_{db} V_{da}} \right) \end{bmatrix} \tag{36}$$

O Coeficiente de Transmissão é calculado pela Equação (37) utilizando os termos da Matriz de Transferência.

$$\tau = \frac{2 \cdot e^{jkd}}{T_{11} + \left( \frac{T_{12}}{\rho \cdot c} \right) + \rho \cdot c \cdot T_{21} + T_{22}} \tag{37}$$

#### 4.1.2 Método de carga única

Sob certas circunstâncias é possível se aproveitar da natureza recíproca da amostra para gerar duas novas equações, ao invés de realizar uma segunda medição (YOO & OLIVIERI, 2007).

Para amostras que possuem simetria geométrica, os procedimentos explicitados na seção 4.1.1 podem ser simplificados, já que a reciprocidade impõe duas restrições à matriz de transferência: a primeira é de que a matriz é simétrica em relação à diagonal secundária, a segunda condição é que a matriz possui determinante igual à unidade (YOO & OLIVIERI, 2007).

Assim como no Método da Carga Dupla, os valores da função de transferência para cada ponto serão obtidos utilizando o *ITA-Toolbox* no *MATLAB*. Os valores dos coeficientes A, B, C e D obtidos a partir da Equação 33. Os valores de  $\rho_0$ ,  $\rho_d$ ,  $u_0$  e  $u_d$  serão obtidos a partir da Equação 35.

Desta forma, os elementos da matriz podem ser determinados com uma única medição, sendo que a matriz terá a seguinte forma:

$$T = \begin{bmatrix} \left( \frac{p_d v_d - p_o v_d}{p_o v_d - p_d v_o} \right) & \left( \frac{p_o^2 - p_d^2}{p_o v_d - p_d v_o} \right) \\ \left( \frac{v_o^2 - v_d^2}{p_o v_d - p_d v_o} \right) & \left( \frac{p_d v_d + p_o v_o}{p_o v_d - p_d v_o} \right) \end{bmatrix} \quad (38)$$

Onde os subscritos 0 indicam a posição  $x=0$  e os subscritos d indicam a posição  $x=d$ .

### 4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

#### 4.3.1 Hardware

Alguns equipamentos foram necessários para obtenção e tratamento de dados.

Tabela 5 – Listagem de componentes de *Hardware*.

| Item | Descrição                                                   |
|------|-------------------------------------------------------------|
| 1    | Microfone G.R.A.S de 1/2"                                   |
| 2    | Fonte de alimentação DC p/ microfone G.R.A.S 12AL - 1 Canal |
| 3    | Amplificador de potência - ALESIS RA-100                    |
| 4    | Conversor AD/DA - RME Hammerfall DSP Multiface II           |
| 5    | Caixa acústica com fonte sonora e cone de redução           |

Fonte: Autoria própria.



Figura 20 – Microfone e fonte de alimentação do microfone.

Fonte: Autoria própria.



Figura 21 – Amplificador de potência e conversor AD/DA

Fonte: Autoria própria.

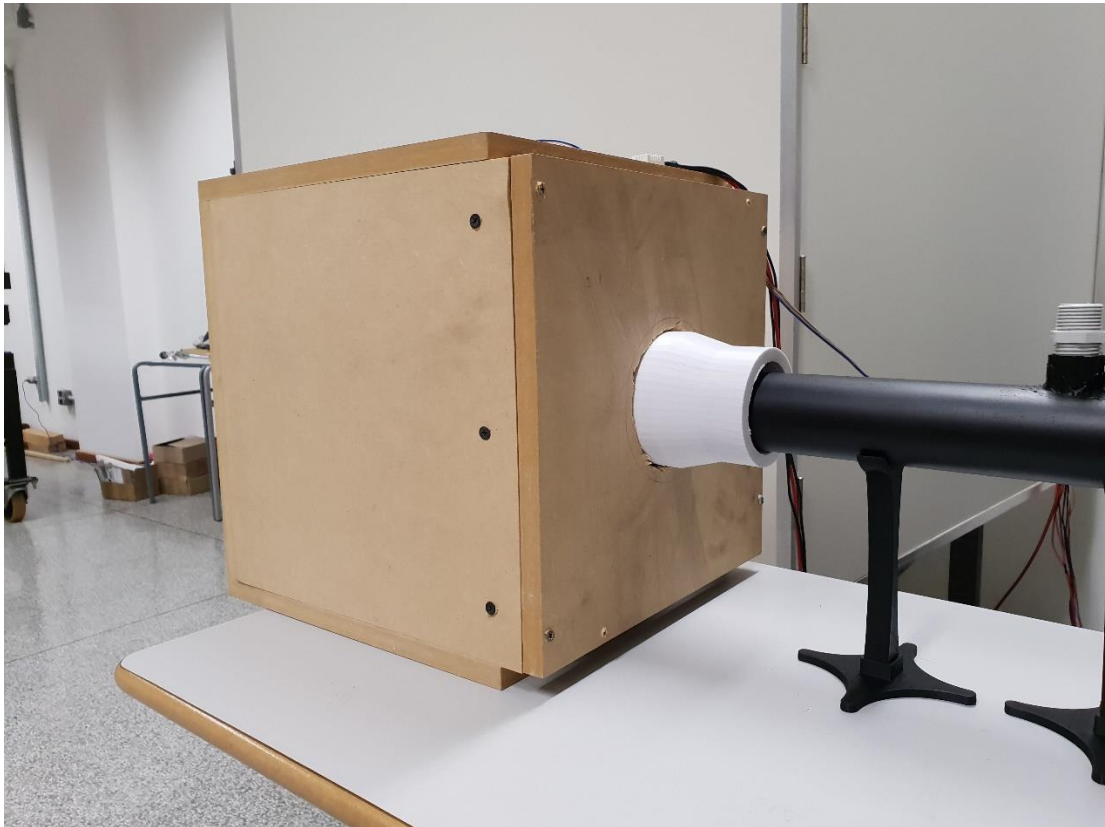


Figura 22 – Caixa acústica de Busulo (2012).

Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.2 Software

Conforme citado nas seções 4.1.1 e 4.1.2, para aquisição dos dados foi utilizado um *Toolbox* de MATLAB, chamado *ITA-Toolbox*, que utiliza conceitos de programação

orientada a objeto, a fim de facilitar o manuseio e obtenção de dados de áudio e simulação. A utilização desse *toolbox* tem como intuito a obtenção das funções de transferência nas dadas posições dos microfones. As Figuras 23 e 24 mostram a interface do software:

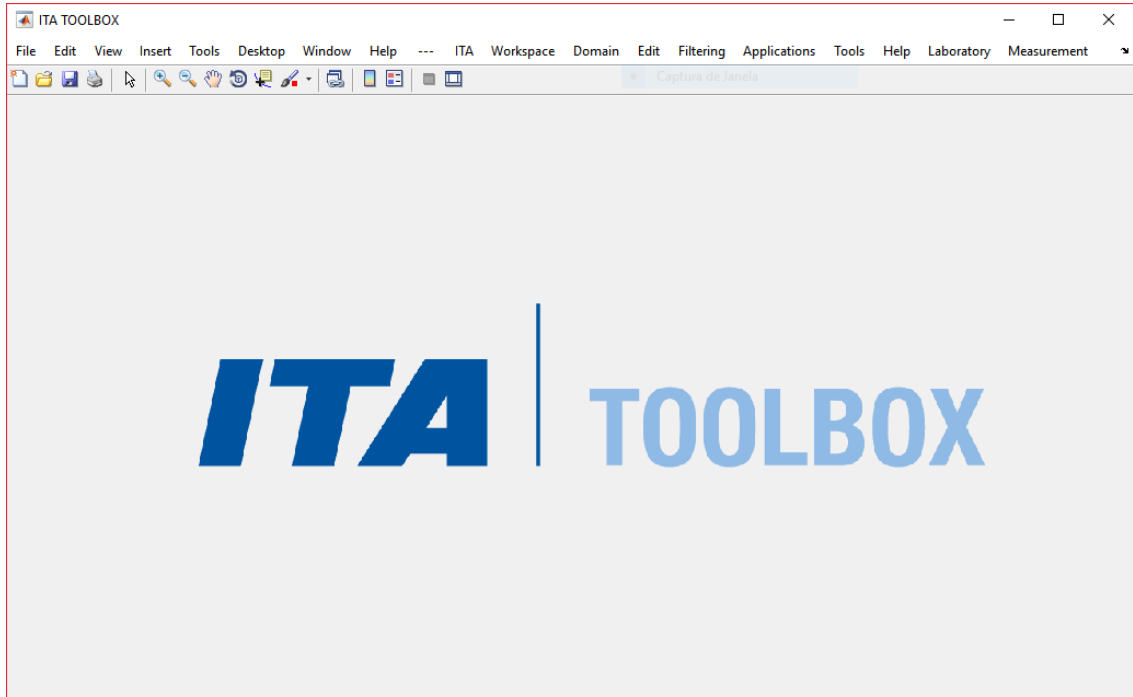


Figura 23 – Interface inicial do ITA-toolbox.

Fonte: Autoria própria.

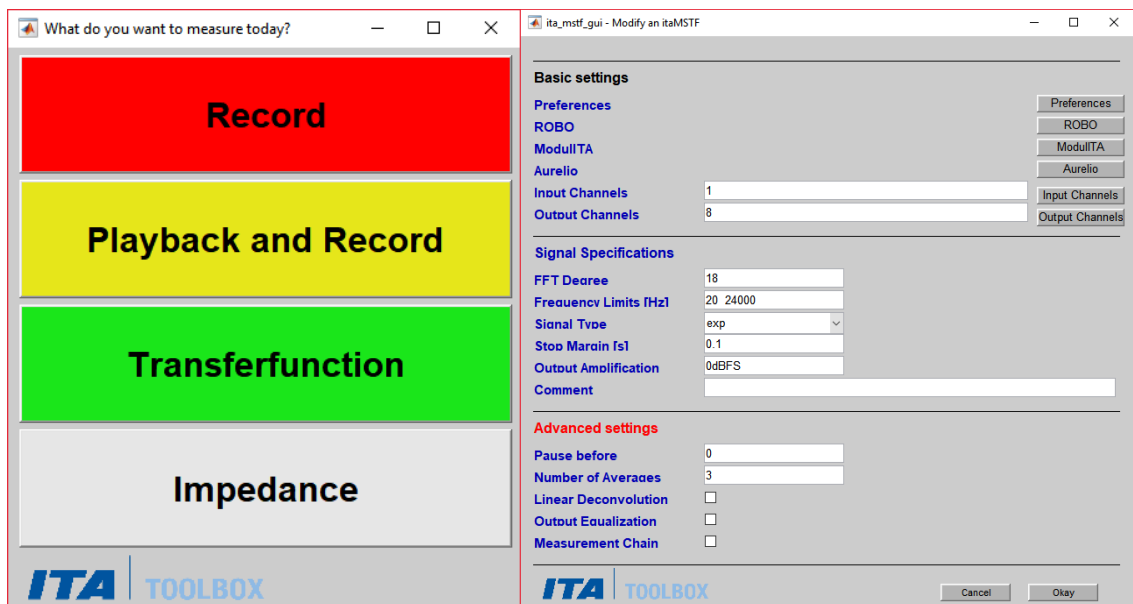


Figura 24 – Janela de obtenção de função de transferência.

Fonte: Autoria própria.

Como o projeto tem o propósito de ser de custo reduzido, será utilizado apenas um microfone para obtenção dos dados, portanto, segundo a norma ASTM E2611-09 a referência da função de transferência para esse caso é o sinal emitido pela própria fonte sonora, conforme segue Tabela 6:

**Tabela 6 – Configurações de Medição e Procedimentos.**

| <b>Nº de Canais</b> | <b>Nº de Microfones</b> | <b>Ref. da Função de Transf.</b> | <b>Funções Medidas</b>                                                  | <b>Correção</b>                                                                                                           | <b>Procedimento</b>                   |
|---------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 2                   | 1                       | sinal da fonte                   | H <sub>1S</sub> , H <sub>2S</sub> , H <sub>3S</sub> , H <sub>4S</sub>   | nenhuma                                                                                                                   | único microfone vai das posições 1-4  |
| 2                   | 2                       | microfone 1 na posição 0         | H <sub>10</sub> , H <sub>20</sub> , H <sub>30</sub> , H <sub>40</sub>   | nenhuma                                                                                                                   | microfone 2 vai das posições 1-4      |
| 2                   | 2                       | microfone 1 na posição 1         | H <sub>11=1</sub> , H <sub>21</sub> , H <sub>31</sub> , H <sub>41</sub> | nenhuma                                                                                                                   | microfone 2 vai das posições 2-4      |
| 4                   | 4                       | microfone 1 na posição 1         | H <sub>11=1</sub> , H <sub>21</sub> , H <sub>31</sub> , H <sub>41</sub> | H <sub>21</sub> <sup>C</sup> , H <sub>31</sub> <sup>C</sup> , H <sub>41</sub> <sup>C</sup>                                | microfones 1-4 fixos nas posições 1-4 |
| 5                   | 4                       | sinal da fonte                   | H <sub>1S</sub> , H <sub>2S</sub> , H <sub>3S</sub> , H <sub>4S</sub>   | H <sub>1S</sub> <sup>C</sup> , H <sub>2S</sub> <sup>C</sup> , H <sub>3S</sub> <sup>C</sup> , H <sub>4S</sub> <sup>C</sup> | microfones 1-4 fixos nas posições 1-4 |
| 5                   | 5                       | microfone 5 na posição 0         | H <sub>10</sub> , H <sub>20</sub> , H <sub>30</sub> , H <sub>40</sub>   | H <sub>10</sub> <sup>C</sup> , H <sub>20</sub> <sup>C</sup> , H <sub>30</sub> <sup>C</sup> , H <sub>40</sub> <sup>C</sup> | microfones 1-4 fixos nas posições 1-4 |

**Fonte: (ASTM E2611 – 09, 2009).**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validação dos resultados que foram obtidos nas medições realizadas com o tubo construído, foram realizados três tipos de medições:

- Uma medição com o tubo vazio;
- Uma medição comparativa com amostras que já tinham uma curva de TL conhecida;
- Medições de duas amostras de diferentes materiais (madeira e alumínio, conforme Figura 25), e comparação de seus resultados com uma curva teórica, baseada na Lei da Massa.

No que diz respeito à tratativa dos dados, foi utilizado o método das duas cargas, por ter apresentado resultados mais sólidos quando em comparação ao método de carga única, possivelmente devido às simplificações que são consideradas como verdadeiras pelo método. Ambas amostras possuem diâmetro de 50 mm, a mostra de madeira tem 10 mm de espessura e a de alumínio 3 mm de espessura. Também foram estimadas as densidades das amostras, tomando como base sua massa e volume. A amostra de alumínio possui densidade de  $2689,1 \text{ kg/m}^3$  e a de madeira  $694,7 \text{ kg/m}^3$ .



Figura 25 – Amostras de madeira e alumínio.

Fonte: Autoria própria.

## 5.1 TUBO VAZIO

Sem material para impedir a passagem do som dentro do aparelho, o esperado é que a Perda de Transmissão (TL) seja próxima de zero.

Na Figura 26 é possível observar a curva de TL em função de cada frequência da varredura. Na faixa de frequência de operação dimensionada para o tubo (400Hz a 4300Hz) é possível notar valores de TL muito próximos a 0 dB.

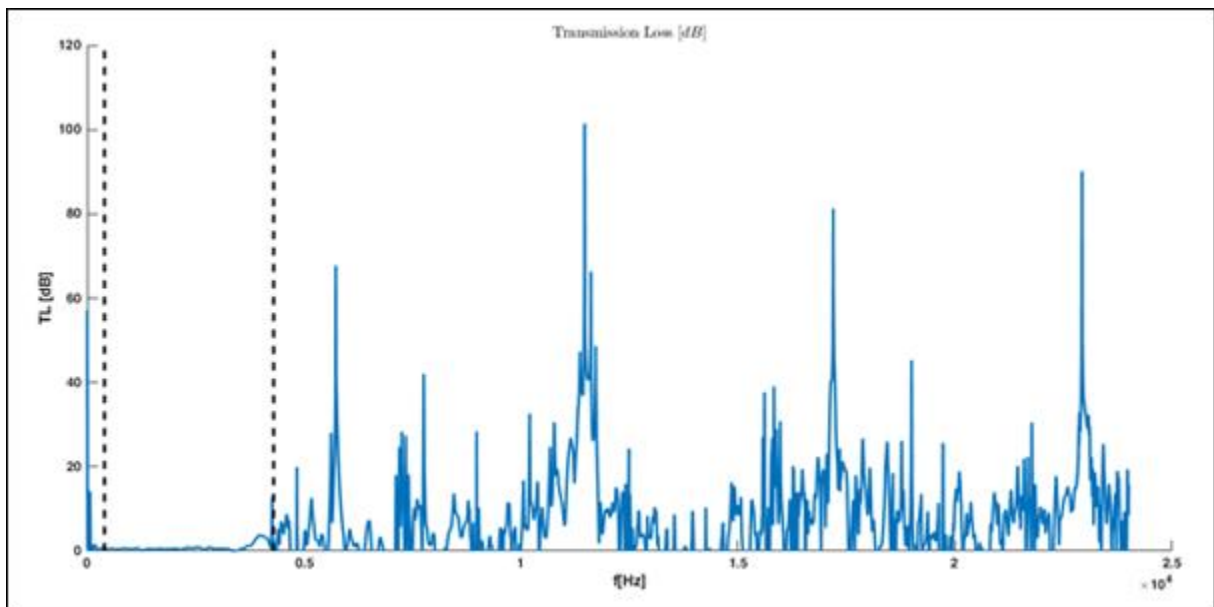
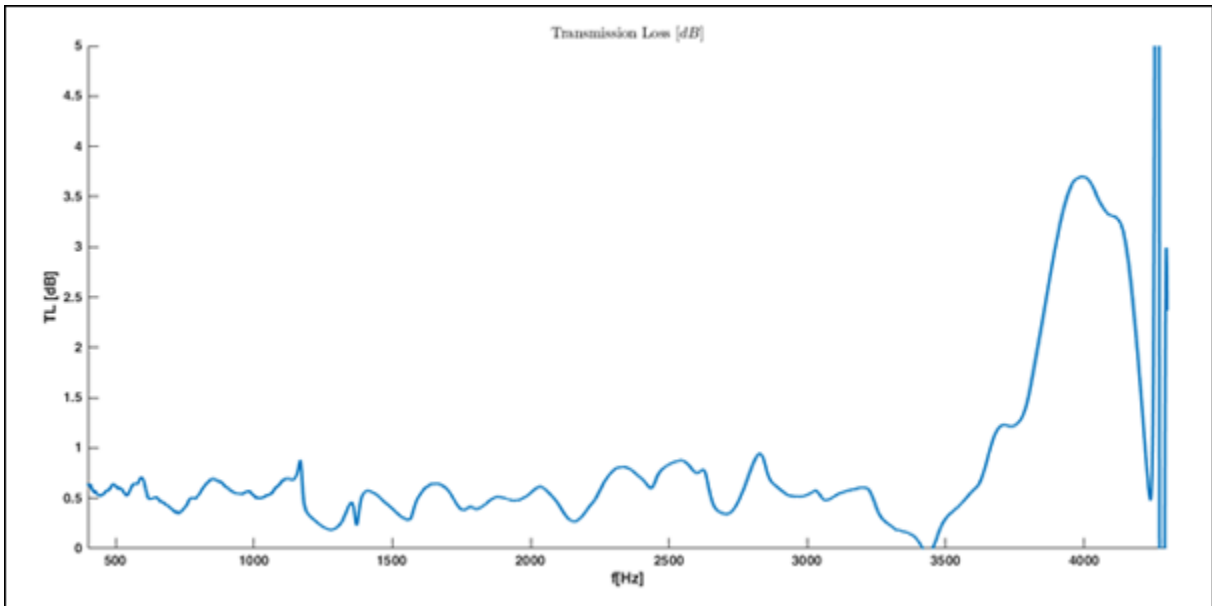


Figura 26 – Gráfico de TL x f para tubo vazio.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 27 é possível notar em detalhe os valores de TL na faixa de frequência proposta a ser analisada no tubo. Entre os valores de 400 Hz e 4300 Hz, o valor se aproxima mais de zero, sendo que sua média nesse intervalo é de 0,8309 dB, com desvio padrão de 1,0282 dB. Já entre 400 dB e 4000 dB, a média é 0,6757 dB, com desvio padrão de 0,6071 dB, indicando que essa é possivelmente uma melhor faixa de análise para o tubo. Esses valores contribuem para a validação dos resultados de dimensionamento e construção.



**Figura 27 – Detalhe da faixa de frequência de interesse.**

**Fonte: A autoria própria.**

## 5.2 AMOSTRAS DE ESPUMA

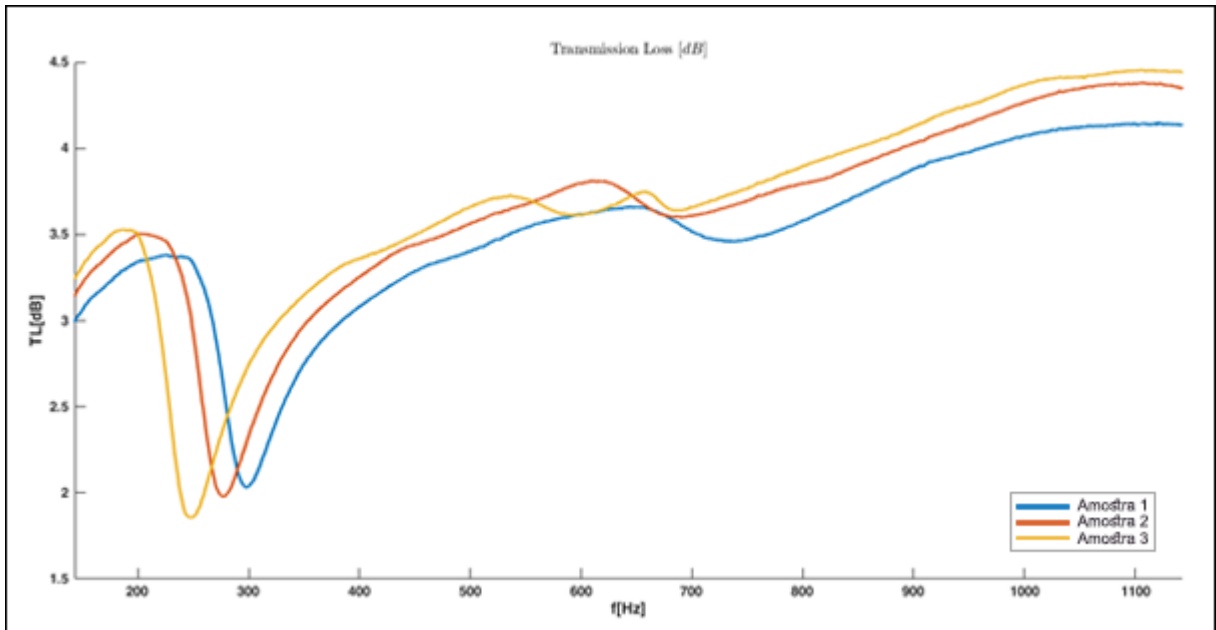
Com a finalidade de comparar valores, três amostras de espuma com 40 [mm] de espessura foram fornecidas pelo setor de Acústica e Vibrações da PUC-PR, por meio do doutorando Fernando Jun Hattori Terashima. Essas amostras foram analisadas pelo laboratório da PUC-PR em uma faixa de frequência de 143 Hz a 1143 Hz, fornecendo seus respectivos valores de TL.



**Figura 28 – Amostras de espuma fornecidas**

**Fonte: A autoria própria**

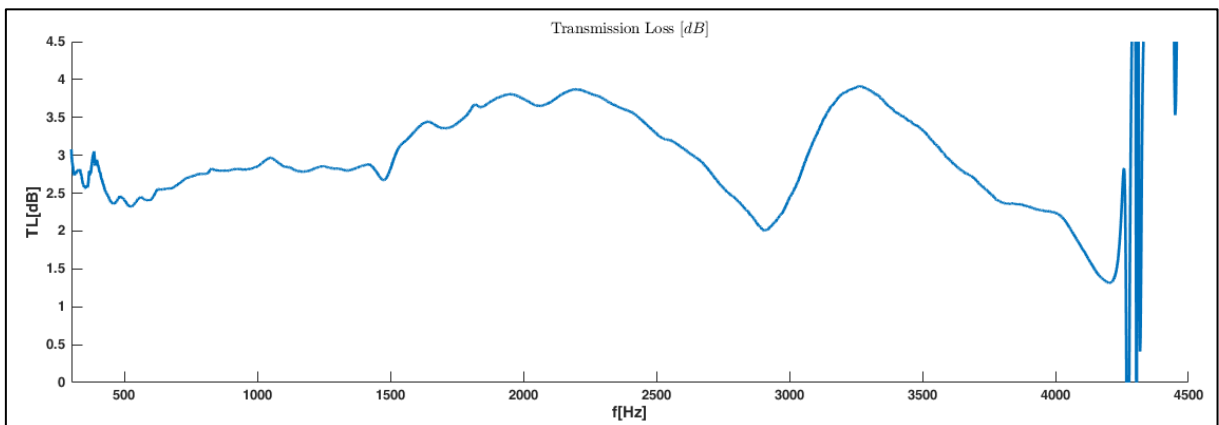




**Figura 29 – Gráfico de TL x f das amostras de espuma fornecidas pela PUC-PR**

**Fonte: Dados de PUC-PR e Gráfico de Autoria Própria**

Uma das amostras fornecidas foi adaptada e analisada pelo aparelho desenvolvido no presente trabalho, gerando resultados para a faixa de frequência que foi determinada em projeto, com resultados apresentados na Figura 30.



**Figura 30 – Gráfico de TL x f medido no tubo de fabricação própria**

**Fonte: Autoria Própria**

Na Figura 31 estão sobrepostas as curvas, para fim de comparação. Nota-se que a partir da faixa proposta de análise (400 Hz) ambas curvas apresentam características semelhantes. Entre 400 Hz e 1143 Hz, a diferença média é de 1,0869 dB e desvio padrão dessa diferença de 0,6818 dB.

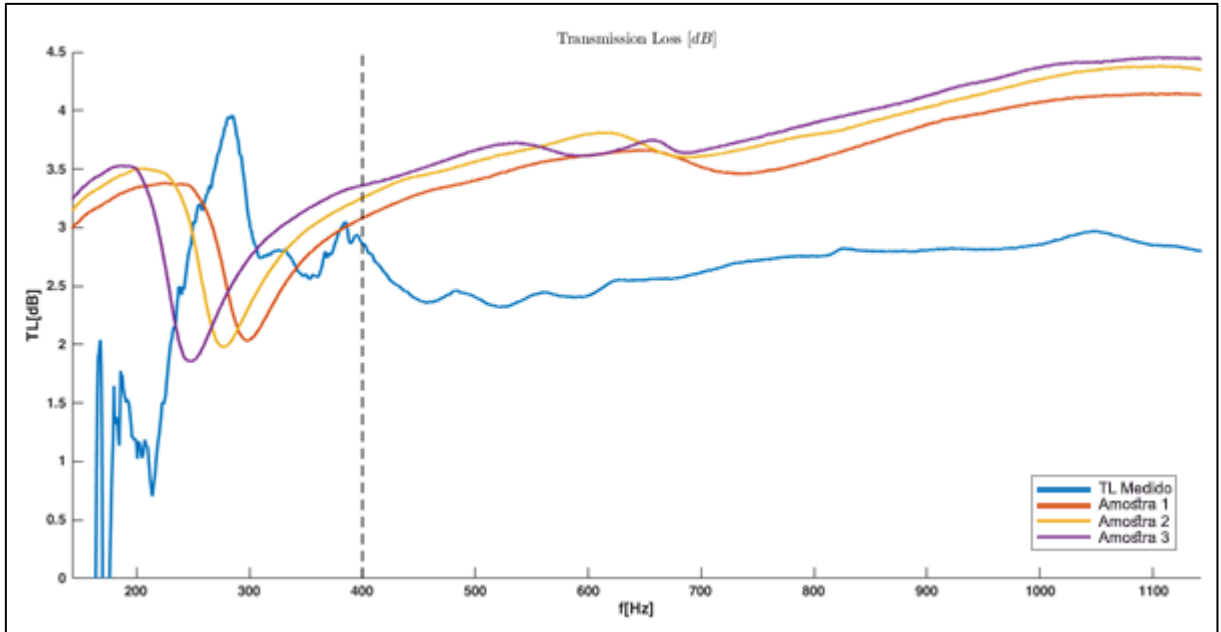


Figura 31 – Comparação entre resultados de TL

Fonte: Autoria Própria

### 5.3 AMOSTRA DE MADEIRA

A Figura 32 apresenta resultados de TL x f obtidos na análise de uma amostra de madeira de 10 mm de espessura.

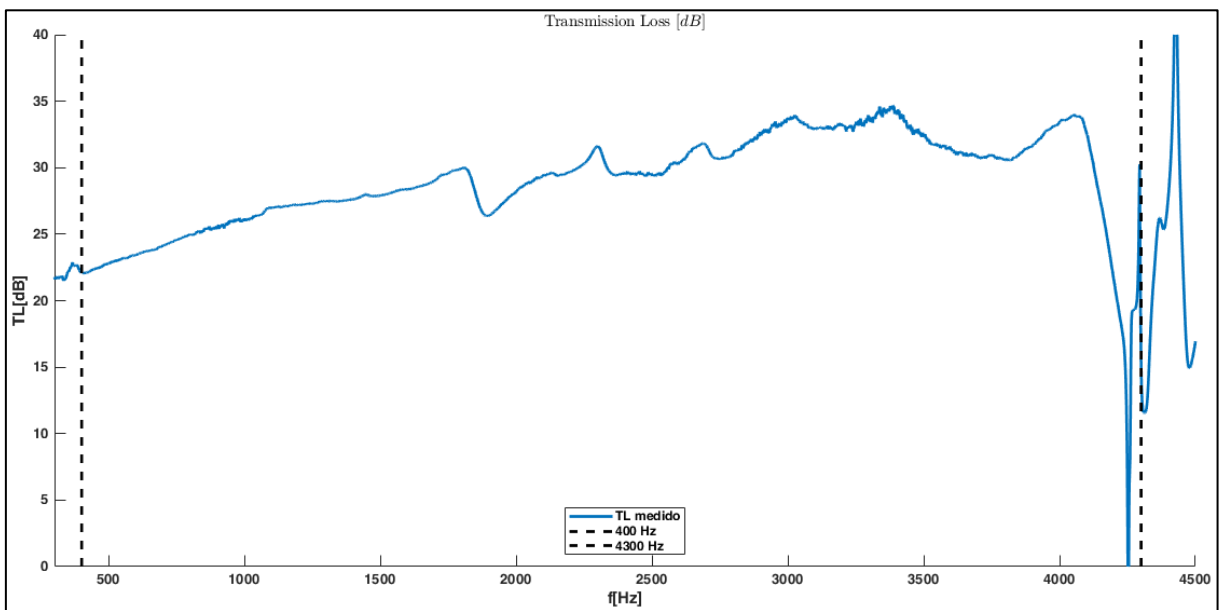
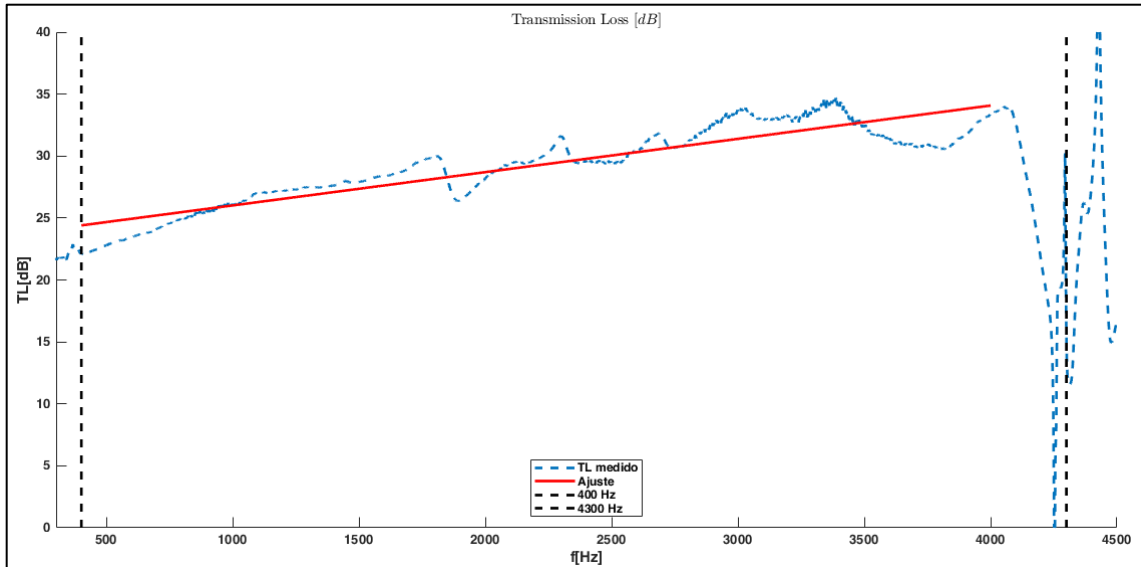


Figura 32 – Gráfico de TL x f de amostra de madeira

Fonte: Autoria Própria

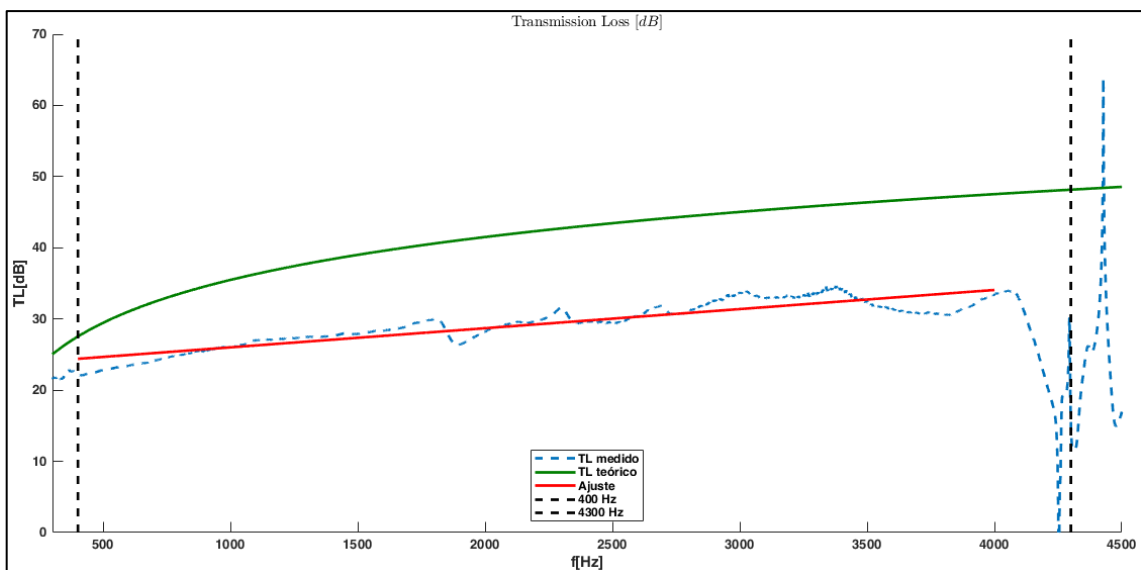
A Figura 33 apresenta um ajuste linear feito pelo Método dos Mínimos Quadrados, com base nos dados entre 400 Hz e 4000 Hz. Percebe-se que a cada intervalo de oitava o TL aumenta abaixo de 6 dB, o esperado dentro do referencial teórico para a Lei da Massa.



**Figura 33 – Reto ajustada para a madeira**

Fonte: Autoria Própria

Utilizando a Equação 17, foi calculado o valor teórico de TL para a madeira dentro do intervalo da Lei da Massa, conforme Figura 34. A diferença média entre a curva teórica e o valor obtido no intervalo de 400 Hz a 4000 Hz foi de 11,8320 dB (40,46%), com desvio padrão de 2,4321 dB.



**Figura 34 – Comparação entre curva ajustada e curva teórica para madeira**

Fonte: Autoria Própria

#### 5.4 AMOSTRA DE ALUMÍNIO

A Figura 35 apresenta resultados de TL x f obtidos na análise de uma amostra de alumínio de 3 mm de espessura.

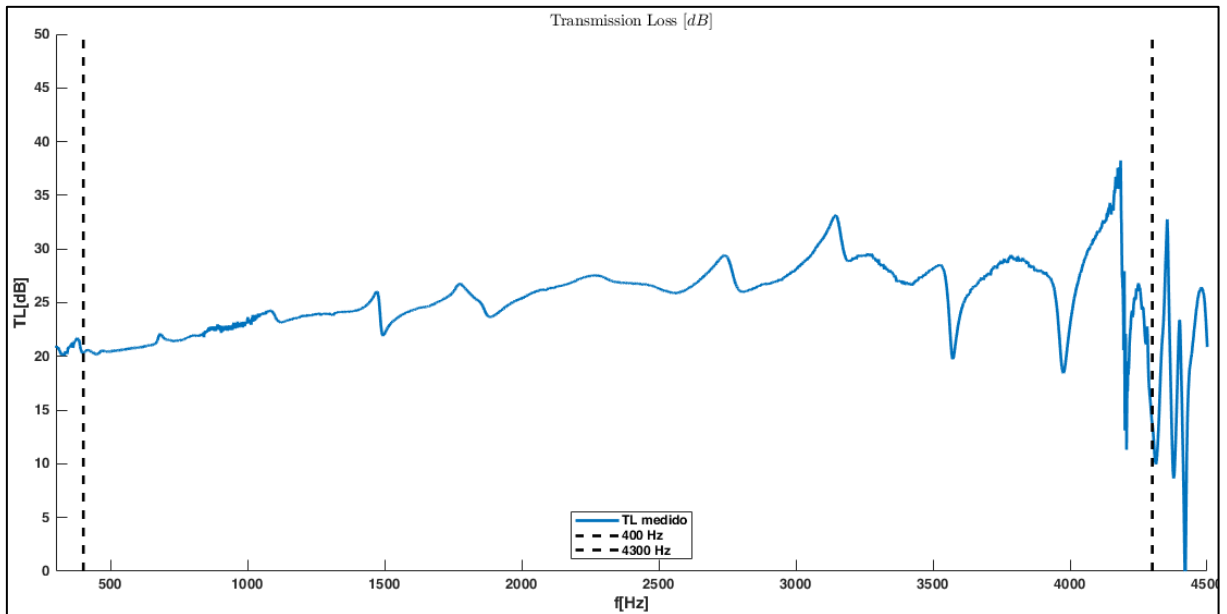


Figura 35 – Gráfico de TLxf de amostra de Alumínio

Fonte: Autoria Própria

Utilizando a mesma metodologia de análise usada na seção anterior, obtém-se uma reta ajustada para o alumínio, conforme a Figura 36.

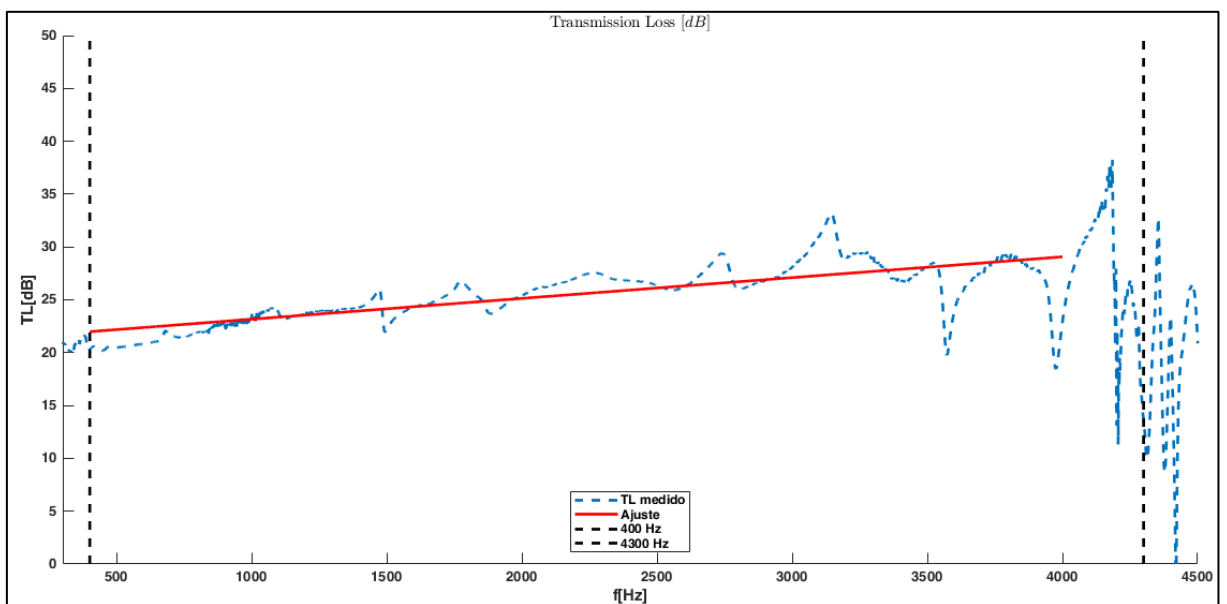


Figura 36 – Reta ajustada para a alumínio

Fonte: Autoria Própria

#### 5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os resultados das medições para o tubo vazio, os valores de TL na faixa de 400 Hz a 4300 Hz se apresentaram próximos do valor esperado de 0 dB. Entretanto notou-se que na faixa de 400 Hz a 4000 Hz o resultado é mais consistente, conforme evidenciado empiricamente na seção 5.1, sendo um bom indício de que o projeto de dimensionamento do tubo, e sua construção, estão coerentes.

Para a análise comparativa realizada para as amostras de espuma fornecidas pela PUC-PR, é possível perceber que as curvas possuem uma tendência similar, porém apresentam um deslocamento no valor de TL, como citado na seção 5.2.

Quanto a análise das outras duas amostras (alumínio e madeira), com relação à curva teórica, no intervalo da Lei da Massa, nota-se uma divergência maior. Observando os resultados de Barnand e Rao (2004) e Yousefzadeh *et al.* (2008), é possível ver que diferentes métodos de medição geram resultados com grandes variações, conforme Figura 37, que apresenta curvas para amostras de aço utilizando três tipos de métodos diferentes para análise.

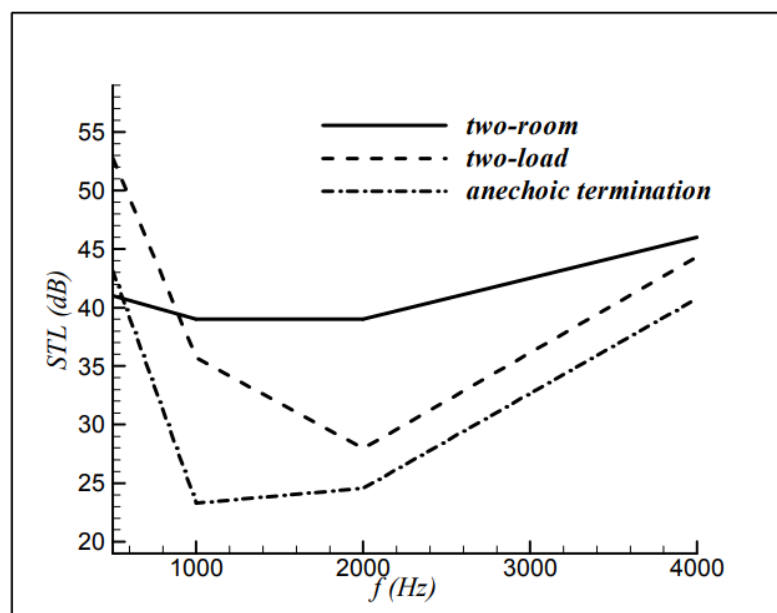


Figura 37 – Comparação entre métodos de análise para amostra de aço.

Fonte: YOUSEFZADEH *et al.* (2008).

No trabalho desenvolvido por Yousefzadeh *et al.* (2008), é mostrado que para amostras de aço, chumbo e compensado, a mudança de método utilizado na tratativa dos dados altera de maneira significativa o resultado apresentado. Dessa forma

comparar a curva teórica de TL, com os dados obtidos através do Método das Duas Cargas, pode também apresentar divergências significativas. Em trabalhos futuros seria interessante comparar outros métodos de análise para avaliar qual se aproxima mais dos valores teóricos.

Como próximos passos sugere-se: realizar medições utilizando diferentes terminações; análise comparativa entre amostras de diferentes espessuras; variação de material e espessura do corpo do tubo; ajustes de construção e manufatura; analisar comparativamente mais amostras que possuem curvas conhecidas de TL.

Considerando a utilização do Método das Duas Cargas, possíveis ajustes estariam nas duas terminações utilizadas, sendo possível variar o material e também sua geometria. Para a terminação anecóica, o ideal seria medir o Coeficiente de Absorção do material, para garantir que seu valor esteja o mais próximo possível da unidade. Uma opção para esse tipo de terminação é, ao invés de utilizar apenas um tarugo de material ao fim do tubo, construir uma caixa acústica forrada com material de alta absorção. Com relação à terminação reflexiva, pode-se testar materiais com maior densidade e espessura.

Uma análise válida também é a realização de medições comparativas entre amostras de mesmo material, porém com espessuras diferentes, para verificar a variação dos valores de TL conforme a espessura aumenta. De forma semelhante, pode-se alterar a espessura do PVC utilizado no corpo do tubo – a fim de diminuir a interferência de ruídos externos – ou ainda utilização de materiais mais densos, como alumínio ou aço (aumentando os gastos de produção).

## 6 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi realizada toda etapa de pesquisa, projeto e concepção de um tubo de impedância capaz de analisar a propriedade acústica de perda de transmissão (TL), seguindo as recomendações da norma ASTM E-2611-09, e também sua validação com análises obtidas através da metodologia de função de transferência (empregando o Método das Duas Cargas), utilizando apenas um microfone para obtenção de dados, com intuito de reduzir os gastos do processo.

Em um primeiro momento, com a análise do tubo vazio observou-se que a faixa de frequência para que o tubo foi dimensionado se mostrou coerente. Foi possível visualizar que a medição apresentava valores muito próximos de zero no intervalo de 400 Hz até 4000 Hz. Outro resultado relevante para validação da construção é a avaliação comparativa dos dados de TL conhecidos de uma amostra de espuma e dados obtidos através do tubo construído. Como as faixas de frequência nesse caso eram diferentes, a análise realizada foi na interseção de ambos estudos. Nessa faixa percebe-se que a característica da curva obtida é semelhante, porém apresenta um valor de TL um pouco abaixo, cerca de 1,1 dB em média.

Além dos dois estudos já citados, ainda foram realizadas duas medições com amostras de madeira e alumínio, respectivamente, e comparou-se os resultados obtidos para essas amostras com sua curva teórica na região governada pela Lei da Massa. Para essa análise foram notadas divergências entre as duas curvas, explicadas na seção 5.4.

Levando em conta todos os resultados obtidos, nota-se que a construção do tubo foi coerente com seu projeto e dimensionamento, e as divergências nos resultados analisados podem ser decorrentes de alguns fatores como: métodos de manufatura do protótipo; qualidade da fonte sonora; material do tubo não possuir isolamento suficiente; espessura da parede do corpo do tubo; capacidade de absorção insuficiente na terminação anecóica; terminação rígida pouco reflexiva.

Ao realizar as medições das amostras, observou-se uma alta repetibilidade dos dados obtidos. Mesmo em momentos com incidência de ruído os resultados apresentados eram condizentes com os demais. Medições realizadas em dias diferentes também apresentavam dados similares, dadas as correções de densidade e velocidade do ar em função da temperatura ambiente.

As principais dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do trabalho foram relacionadas majoritariamente à manufatura do tubo e obtenção dos dados. O manuseio do PVC se mostrou um tanto complicado para realização das furações que iriam comportar os microfones, devido à precisão necessária; garantir concentricidade do tubo, fonte sonora e amostra também se mostrou desafiador, tendo sido necessário projeto de um suporte para apoiar o tubo; foi necessário realizar testes com diferentes terminações no tubo, até chegar ao resultado mais satisfatório (utilização de tarugo de espuma); a transmissão de vibrações geradas pela fonte sonora para o tubo se mostrou crítica quando eram realizadas as análises de dados obtidos, sendo necessário que medidas fossem tomadas para evitar essa propagação; entendimento de como manusear a estrutura de dados gerados pelo *software* utilizado nas análises demandou uma parcela de tempo significativa; foi necessário o desenvolvimento e implementação de um *script* específico para as análises desejadas.

Dados todos os fatores mencionados, nota-se que, para esse método, a utilização de um microfone – com intuito de reduzir custos – não afetou de forma significativa o processo, e os resultados obtidos no trabalho se mostraram satisfatórios. Entretanto, como mencionado, alguns pontos selecionados para redução dos custos podem ser aperfeiçoados a fim de obter resultados mais assertivos na caracterização de Perda de Transmissão.



## REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A. G.; DE SOUSA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. São Paulo: Manole, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method**. West Conshohocken, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System**. West Conshohocken, 2010.

BARNARD, A. R.; RAO M. D. **Measurement of Sound Transmission Loss Using a Modified Four Microphone Impedance Tube**. NOISE-CON 2004. Baltimore, Maryland, 2004.

BARRON, R. F. **Industrial Noise Control and Acoustics**. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. São Paulo: Blucher, 2011.

BOLTON, J. S.; YOO, T.; OLIVIERI, O. **Measurement of Normal Incidence Transmission Loss and Other Acoustical Properties of Materials Placed in a Standing Wave Tube**. Brüel & Kjær Technical Review, 2007.

BRANDÃO, E. **Acústica de Salas: Projeto e Modelagem**. São Paulo: Blucher, 2016.

BUSULO, W. F. **Construção de um tubo de impedâncias e teste através do método de função de transferência**. 2017. 56f. Monografia – Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2017

EVEREST, A. F. **The Master Handbook of Acoustics**. New York: McGraw-Hill, 2001.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos de Física – Eletromagnetismo. Vol. 3**. 8. ed. São Paulo: LTC, 2009.

JACOBSEN, S; JUHL, PM. **Fundamentals of General Linear Acoustics**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013.

JUNG S. S. *et al.* **Measurement of Sound Transmission Loss by Using Impedance Tubes**. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 53, No. 2, August 2008, pp. 596.

KUTTRUFF, H. **Room Acoustics**. 5 ed. Oxon: Spon Press, 2009.

LEGAT, N. L. M. **Determinação da impedância acústica e do número de onda de placas finas de fibra de coco com quatro métodos experimentais de avaliação**. Dissertação – PUC-PR. Curitiba, 2017.

RAO, M.D.; DESHPANDE, S. P. **Development of a low cost impedance tube to measure acoustic absorption and transmission loss of materials**. 121st Annual Conference & Exposition, Indianapolis, 2014.

STECK. **Catálogo comercial Steck**. Steck, 2018. Disponível em: <[https://www.steck.com.br/assets/uploads/produto\\_categorias/259/documento/a81f4e7886b87a77c3dede80dec7bca7.pdf](https://www.steck.com.br/assets/uploads/produto_categorias/259/documento/a81f4e7886b87a77c3dede80dec7bca7.pdf)>. Acesso em: 21 out. 2018.

TERASHIMA, F. J. H. **Caracterização das propriedades acústicas de materiais absorventes de pequenas espessuras com três métodos de avaliação**. Dissertação – PUC-PR. Curitiba, 2016.

VORLÄNDER, M. **Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality**. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Noise: Data and statistics**. World Health Organization, 2018. Disponível em: <<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/data-and-statistics>>. Acesso em: 13 out. 2018.

YOUSEFZADEH, B.; MAHJOOB M.; MOHAMMADI, N.; SHAHSAVARI, A. **An experimental study of Sound Transmission Loss (STL) measurement techniques using an impedance tube**. Acoustics 08, Paris, 2008.