

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
GOIÁS
Câmpus Formosa

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LUIS HENRIQUE SPINDOLA DO SANTOS

**CONSTRUÇÃO DE UM TUBO DE IMPEDÂNCIA PARA ANÁLISE DE
MATERIAIS USADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Formosa – GO

2022

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Luis Henrique Spindola dos Santos

Matrícula: 20151070080186

Título do Trabalho: Construção de um tubo de impedância para análise de materiais usados na construção civil.

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

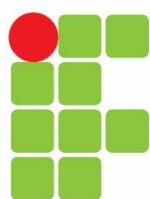
DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Formosa, 19/02/23.
Local Data

Luis Henrique Spindola dos Santos
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
GOIÁS
Câmpus Formosa

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LUIS HENRIQUE SPINDOLA DOS SANTOS

**CONSTRUÇÃO DE UM TUBO DE IMPEDÂNCIA PARA ANÁLISE DE
MATERIAIS USADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Câmpus Formosa como parte
dos requisitos para a obtenção do
grau de Bacharelado em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Ordine
Vieira Lopes

Co-orientador: Prof. Me. Divino
Gabriel Lima Pinheiro

Formosa – GO

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S237c

Santos, Luis Henrique Spindola dos

Construção de um tubo de impedância para análise de materiais usados na construção civil/

Luis Henrique Spindola dos Santos — Formosa, 2023.

63 f. : il. : color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Ordine Vieira Lopes.

Co-orientador: Prof. Me. Divino Gabriel Lima Pinheiro

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC (Graduação) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Formosa, Bacharelado em Engenharia Civil.

1. Construção civil. 2. Materiais de construção. 3. Tubo de impedância. I. Lopes, Daniel Ordine Vieira. II. Pinheiro, Divino Gabriel Lima. III. Título. IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Formosa.

CDD: 691

Bibliotecária: Charlene Cardoso Cruz CRB1-DF nº 2909

ATA Nº 05/ 2023

Engenharia Civil / Câmpus Formosa

1. ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Aos treze dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e três, às 19:00 horas, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso II do Graduando **Luís Henrique Spindola dos Santos** (matrícula 20151070080186) do curso de Engenharia Civil, no segundo semestre letivo do ano de dois mil e vinte dois. A defesa ocorreu via web Conferência pelo Google Meet. A banca foi composta pelos seguintes membros:

- Daniel Ordine Vieira Lopes (Orientador)
- Divino Gabriel Lima Pinheiro (Co-orientador)
- Rogério Ferreira Xavier (Avaliador Interno)
- Cleber Alves da Costa (Avaliador Externo)

Sob a presidência do primeiro. O trabalho de conclusão de curso tem como título "**Construção de um tubo de impedância para análise de materiais usados na construção civil**" sob orientação do Prof. Daniel Ordine Vieira Lopes. Após a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso II, tendo sido o autor arguido pela Banca Examinadora, a nota obtida foi **10,0**. A sessão foi encerrada às 20:30 horas. Eu, Prof. André Augusto Nóbrega Dantas, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca.

Prof. André Augusto Nóbrega Dantas

(Assinado eletronicamente)

Prof. Daniel Ordine Vieira Lopes

(Assinado eletronicamente)

Prof. Divino Gabriel Lima Pinheiro

(Assinado eletronicamente)

Prof. Rogério Ferreira Xavier

(Assinado eletronicamente)

Prof. Cleber Alves da Costa

(Assinado eletronicamente)

Prof. Fabiano Campos Macêdo

Coordenador do Curso Bacharelado em Engenharia Civil/ Câmpus Formosa

(Assinado eletronicamente)

Documento assinado eletronicamente por:

- Cleber Alves da Costa , PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO , em 09/02/2023 11:41:43.
- Fabiano Campos Macedo , COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - FOR-CCBENG , em 08/02/2023 15:08:49.
- Rogerio Ferreira Xavier , PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 23/01/2023 23:28:42.
- Divino Gabriel Lima Pinheiro , PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 23/01/2023 18:33:59.
- Daniel Ordine Vieira Lopes , PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 23/01/2023 15:14:20.
- Andre Augusto Nobrega Dantas , PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 23/01/2023 12:03:51.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 23/01/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 366943

Código de Autenticação: c0fdae4199



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 64 esquina com Rua 11, S/Nº, Expansão Parque Lago, Formosa / GO, CEP 73813-816
(61) 3642-9491 (ramal: 9491), (61) 3642-9493 (ramal: 9493)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe que mesmo acompanhando todas minhas dificuldades em permanecer firme nos estudos nunca me deixou perder o foco desse caminho, sempre me motivando e apoiando de todas as formas possíveis, o que se tornou a principal razão de estar onde estou hoje.

Ao meu irmão Leonardo que, hoje já é um engenheiro civil e dentre todas as pessoas que eu convivo é o mais inteligente. Foi meu colega de sala e sem sua ajuda e apoio muito certo que não estaria completando esse árduo caminho que é a graduação em engenharia civil em um instituto federal.

A minha namorada Vitória, discente do curso de Fisioterapia - UEG, que participa de diversas áreas de estudo em sua instituição dentre projetos de extensão, trabalhos, iniciações científicas, entre tantas outras funções que mal consigo. Me ajudou no desenvolvimento deste trabalho, aconselhando, analisando a parte ortográfica e normativa de formatação, sendo que considero sua ajuda de essencial importância para a finalização do presente trabalho.

Aos meus diversos colegas de turma pelo apoio, incentivo e suporte. Em especial ao Matheus Costa e Weliton que assim como o Leonardo, sua ajuda durante o curso foi grandiosa e que considero crucial para conseguir finalizar essa graduação.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Ordine Vieira Lopes que acreditou no meu trabalho e sempre foi atencioso e solícito em todas as dúvidas que tive durante a relação e estudo do presente trabalho. Assim como meu Co-orientador Prof. Dr. Divino Gabriel Lima Pinheiro que esteve presente nas reuniões sobre o trabalho dando conselhos e dicas de como conseguir finalizá-lo.

Ao Instituto Federal de Goiás e à coordenação de engenharia civil que possibilitou e deu toda a capacitação e ensino necessário para que com a finalização dos cursos eu possa ser um profissional de alto nível no mercado de trabalho.

RESUMO

Existem vários materiais, onde seus diversos fabricantes não fornecem todas as características acústicas necessárias para a realização de um dimensionamento adequado para o meio onde serão aplicados, isso acaba sendo um desafio encontrado por profissionais da área da construção civil. Assim esse trabalho, procurando encontrar uma solução para determinar as principais propriedades indispensáveis a um bom dimensionamento acústico, com um custo acessível, desenvolveu um aparelho comumente conhecido como tubo de impedância, onde aplicará ondas sonoras no material a ser testado e a partir da diferença entre as ondas captadas pelo microfone, tornará possível determinar as características acústicas desse material. Para tanto, o presente trabalho apresenta como foi feito o dimensionamento desse instrumento até chegar nos valores de uma caixa acústica com um volume de 30 litros, utilização de dois microfones da marca PCB modelo 130E22, um tubo de PVC de 50mm de diâmetro e 485mm de comprimento, uma interface de áudio da focusrite e uma amostra com suas características acústicas padronizadas e fornecida pela empresa OWA sonex. Para assim com a utilização do plugin de matlab "ITA-TOLLBOX" processar os dados coletados.

Palavras-chave: Tubo de impedância. Coeficiente de absorção. Função de transferência

ABSTRACT

There are several materials, whose different manufacturers do not provide all the necessary acoustic characteristics to carry out an adequate dimensioning for the environment where they will be applied, this ends up being a challenge encountered by professionals in the field of civil construction. So this work, seeking to find a solution to determine the main properties unbearable to a good acoustic dimensioning, with an accessible cost, developed a device commonly known as impedance tube, where it will apply sound waves in the material to be tested and from the difference between the waves captured by the microphone, making it possible to determine the acoustic characteristics of this material. Therefore, the present work presents how the dimensioning of this instrument was done until reaching the values of a loudspeaker with a volume of 30 liters, using two microphones of the brand PCB model 130E22, a PVC tube of 50mm in diameter and 485mm in length, a focusrite audio interface and a sample with its standardized acoustic characteristics and provided by the OWA sonex company. So with the use of the matlab plugin "ITA-TOLLBOX" to process the collected data.

Key-Words: Impedance tube. Absorption coefficient. transfer function

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Câmara de reverberação	Figura 2 - Tubo de impedância.....	2
Figura 3 - Propagação de uma onda sonora gerada por diapásio.....		6
Figura 4 - Superposição e Interferência entre ondas.....		8
Figura 5 - Soma de ondas se deslocando em sentidos opostos		8
Figura 6 - Onda sonora incidindo sobre anteparo		11
Figura 7 - Representação tudo de impedância com dois microfones		15
Figura 8 - Representação das seções da metodologia		21
Figura 9 Amplificador Mono 10w Rms 12v Tda2003 - Modelo 2019		22
Figura 10 Protótipo da caixa acústica.....		24
Figura 11 Caixa acústica		24
Figura 12 Microfone de eletreto		25
Figura 13 - Representação dão do circuito para ligar o microfone de eletreto ..		25
Figura 14 - Protótipo do microfone de eletreto.....		26
Figura 15 - Amplificador de microfone retirado do DVD.....		26
Figura 16 - Pré Amplificador Para Microfone Dinâmico 2 Canais.....		27
Figura 17 - Pilhas de 12V		28
Figura 18 - Microfone alimentado	Figura 19 - Pré amplificador alimentado	28
.....		28
Figura 20 - PCB Piezotronics, modelo 130E22.....		29
Figura 21 - Comparação entre as ondas sonoras captadas pelos microfones ..		29
Figura 22 - Representação das dimensões do tubo		30
Figura 23 - Corte no tubo de PVC.....		31
Figura 24 - Confeção do tubo		32
Figura 25 - Protótipo do tubo de impedância		32
Figura 26 - Suporte para o tubo.....		33
Figura 27 - Bucha redutora.....		33
Figura 28 - Tubo de impedância montado		33
Figura 29 - Prensa cabos fixado	Figura 30 - Materiais para a colagem ...	34
Figura 31 - Confeção da amostra.....		34
Figura 32 - Coeficiente de absorção sonora Sonex.....		35
Figura 33 - Cap de PVC.....		35
Figura 34 - Placa de Som USB 7.1 Canal Virtual Com 4 Portas Conexão P2 Para Microfone e Fone De Ouvido 4 Saídas		36
Figura 35 - Erro ao iniciar o ita-toolbox		36
Figura 36 - Interface de áudio Focusrite Scarlett 2i4 2ª geração		37
Figura 37 - Tubo de impedância finalizado.....		37
Figura 38 - Encontrando o setup dentro do matlab		38
Figura 39 - Linha de programação do ita-toolbox		39
Figura 40 - Pós processamento realizado pelo Matlab		39

Figura 41 - Configure soundcard.....	40
Figura 42 – Measurement.....	40
Figura 43 - New Measurement Setup.....	40
Figura 44 - Medições realizadas pelo Ita-Toolbox.....	41
Figura 45 - Configurações iniciais para iniciar as medições.....	41
Figura 46 - Configurações da primeira medição.....	42
Figura 47 - Resultado da primeira medição.....	42
Figura 48 - Configuração para as posteriores medições	43
Figura 49 - Medição realizada com o cap de PV	43
Figura 50 - Medição realizada com a amostra dentro do tubo.....	43
Figura 51 - Medição realizada aumentando a intensidade sonora.....	44
Figura 52 - Tipos de tubos utilizados pelo Ita-Toolbox	45
Figura 53 – Applications	Figura 54 - Quantidade de microfones
Figura 55 - Tipos de tubos utilizados.....	46

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1- Ficha técnica do alto-falante	22
Tabela 2 - Especificações técnicas do amplificador do alto falante	23
Tabela 3 - Especificações técnicas do amplificador do microfone	27
Tabela 4 - Especificações técnicas da placa de som	36
 Quadro 1 - Tubos de impedância comercializados pela empresa Brüel & Kjaer	 14

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.2. JUSTIFICATIVA	2
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. Objetivo geral	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
SEÇÃO I	4
2.2. Som e ruído	4
2.3. Natureza do som	4
2.4. Características de uma onda sonora	4
2.5. Ondas sonoras planas.....	5
2.6. Tubos acústicos.....	7
SEÇÃO II	7
2.7. Superposição e Interferência entre ondas	7
2.8. Ondas estacionárias	8
2.9. Impedância acústica específica da onda plana.....	9
2.10. Reflexão e refração do som	10
2.11. Absorção acústica	11
2.12. Ruído branco e ruído rosa.....	12
2.13. Distinção entre absorção e isolamento acústico	12
SEÇÃO III	13
2.14. Tubos de impedância presentes no mercado	14
2.15. O método da função de transferência de dois microfones	14
2.16. Função de transferência.....	15
2.17. Coeficiente de absorção pela função de transferência	15
2.18. Caixa acústica	16
2.19. Diâmetro do tubo	17
2.20. Distância entre microfones.....	18
2.21. Microfone.....	18
2.22. Fixação do microfone.....	19
2.23. Suporte para o tubo.....	19

2.24.	Amostras	19
2.25.	Terminação do tubo.....	19
2.26.	Porta amostras	19
2.27.	Softwares	19
3.	METODOLOGIA	21
	SEÇÃO I	21
3.1	. Caixa acústica	22
	SEÇÃO II	25
3.2.	Microfone	25
3.3.	Diâmetro do tubo	29
3.4.	Distância entre microfones	30
3.5.	Comprimento do tubo	30
3.6.	Fixação do microfone	31
3.7.	Confecção do tubo	31
3.8.	Amostras	34
3.9.	Terminação do tubo e porta amostra	35
3.10.	Interface de áudio	35
3.11.	Tubo construído	37
	SEÇÃO III	37
3.12.	Busca pelo software	37
3.13.	Funcionamento do ita-toolbox	38
3.14.	Realizar as medições no ita-toolbox.....	40
4.	RESULTADOS	41
5.	CONCLUSÃO.....	47
6.	REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

A poluição sonora é um tema pouco comentado em diversos segmentos de ensino que poderiam desenvolver melhor o tema, pois com o constante crescimento populacional e consequentemente das cidades, cada vez mais ruídos são produzidos.

O desconforto que é percebido em diversos ambientes está fortemente relacionado com a intensidade e persistência desses sons que muitas vezes levam as pessoas que estão inseridas nesses meios a desenvolver problemas físicos e psicológicos. (BISTAFA, 2018)

Conforme afirma o autor Bistafa (2018, p.82) os parâmetros físicos que mais contribuem com a sensação subjetiva de incômodo são:

- Conteúdo espectral e níveis sonoros associados;
- A complexidade do espectro e a existência de tons puros;
- Duração;
- Amplitude e frequência;
- Tempo de subida de sons impulsivos.

Para amenizar tais efeitos desagradáveis, pode ser feito o controle desses sons. Para isso é necessário ter as informações referentes aos materiais que serão empregados, no entanto, diversas informações acústicas do material são difíceis de serem medidas. Os métodos recorrentemente usados em diversas literaturas para definir tais propriedades são os da câmara de reverberação e o tubo de impedância (SALVO et al., 2015).

O método da câmara de reverberação, representado na Figura 1, necessita de muitos recursos e equipamentos adequados, tornando o processo muito oneroso. Já o método do tubo de impedância, representado na Figura 2, tende a ser mais acessível, podendo até ser adquirido o equipamento completo por projetistas (SALVO et al., 2015).



Figura 1 - Câmara de reverberação

Fonte: IPT São Paulo

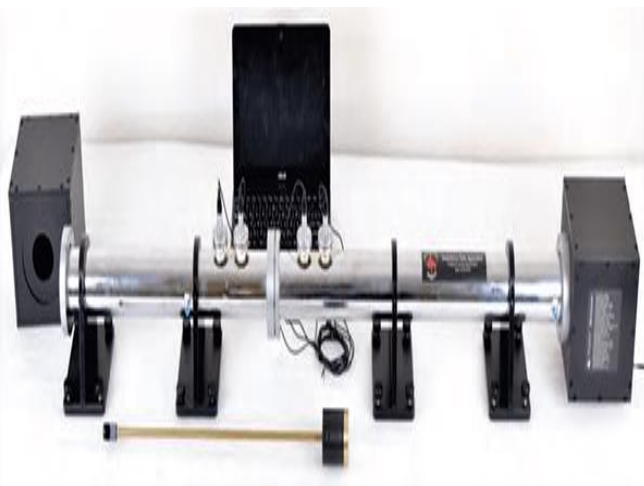


Figura 2 - Tubo de impedância

Fonte: Vivacity

1.2. JUSTIFICATIVA

Um ambiente com um conforto acústico adequado faz-se necessário para a saúde das pessoas. Em certos locais é imprescindível a realização de métodos que controlem os sons externos (PÚBLIO, 2020).

A partir do exposto, arquitetos e engenheiros precisam planejar ambientes agradáveis acusticamente. Exemplos desses locais são os teatros, salas escolares e residências. Em alguns desses é fundamental um certo grau de compreensão dos sons e o controle do volume dos ruídos sonoros. Com o intuito de minimizar esses malefícios, são empregados materiais para amenizar ruídos, sendo as propriedades deles, essenciais para o cumprimento de sua função esperada (PÚBLIO, 2020).

No entanto, esses variados experimentos e testes necessitam de equipamentos e laboratórios que geralmente possuem alto valor aquisitivo. Pensando nisso, o presente trabalho se preocupa em realizar a confecção de um equipamento que realize a função de medir tais propriedades dos materiais, o tubo de impedância, a um preço acessível a maioria dos projetistas, pesquisadores e estudantes.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na confecção de um tubo de impedância diante um valor acessível, contando também com a verificação da sua precisão a partir de comparações de medidas obtidas com materiais padronizados, podendo ser utilizado para possíveis futuras medições de materiais empregados na construção civil e criação de novos materiais com a mesma finalidade.

1.3.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Dimensionar e fabricar um tubo de impedância com materiais acessíveis e de baixo custo;
- Realizar medições da impedância de materiais padronizados para determinar o grau de precisão do aparato construído.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi dividida em seções para melhor compreensão do leitor em relação à importância do funcionamento de cada item.

A seção I foi elaborada para trazer uma explicação dos conceitos básicos envolvendo ondas, descrevendo a diferença de som e ruído, a natureza do som e características matemáticas de ondas genéricas e ondas planas.

Na seção II foram abordados conceitos relativos ao comportamento de diversas ondas se propagando no ar. Dentre elas a superposição de ondas, impedância, absorção sonora, interferência entre onda, reflexão e refração, como gerar ondas estacionárias e finalizando a seção com conceitos que são mais facilmente entendidos se já houver conhecimento prévio sobre os comportamentos sonoros vistos anteriormente como ruído branco, rosa e distinção entre absorção e isolamento acústico.

E finalmente terminando a revisão com a seção III, que explicará como será feito o dimensionamento do tubo de impedância, seu funcionamento e propriedades sonoras encontradas.

SEÇÃO I

2.2. Som e ruído

Será iniciada uma revisão dos princípios físicos sobre o som, onde nos baseamos principalmente no trabalho de Bistafa (2018).

Som ou ruído é uma forma que o cérebro interpreta determinados estímulos que chegam pelo ar, esses estímulos são vibrações geradas por objetos vibrantes, mas não é todo objeto que vibra que gera som, pois essas vibrações devem ser geradas de maneira adequada, sendo a diferença de som e ruído a vontade ou a necessidade do indivíduo de escutar esse estímulo.

Os ruídos causam diversos males a seu ouvinte, quando muito alto pode ocasionar perda de audição (efeito fisiológico) e incômodos (efeito psicológico).

2.3. Natureza do som

O som pode ser entendido como uma variação na pressão do ambiente detectável por um aparelho receptor. A menor variação detectada pelo ouvido humano é de cerca de 2×10^{-5} Pa (limiar a audição). Já a maior variação é de 20 a 200 Pa (limiar da dor) (BISTAFA, 2018).

2.4. Características de uma onda sonora

- Amplitude (x_m) é a maior pressão em que a onda consegue alcançar em um espaço de tempo, podendo, essa medida ser tanto positiva quanto negativa, a representação dessa grandeza física está na Figura 3;
- Período (T) é o tempo necessário para que a onda complete 1 ciclo;
- Frequência (f) é a quantidade de ciclos que ocorre em um determinado período;
- Comprimento de onda (λ) é a distância entre os ciclos de uma onda a representação dessa grandeza física está na Figura 3;

- Número de onda (k) é o número de ondas por distância (HALLIDAY et al., 2009).

Movimentos que se repetem com regularidade e de forma contínua são denominados periódicos ou harmônicos e existem movimentos onde as partículas oscilam entre o seu ponto de equilíbrio, que pode ser descrito como (HALLIDAY et al., 2009)

$$u(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Quando os valores de x_m , ω e φ são constantes esse movimento é chamado de movimento harmônico simples (MHS).

A grandeza x_m será a amplitude do movimento que é constante e positiva cujo valor depende somente de como o deslocamento é feito. Já a parte $(\omega t + \varphi)$ é a fase do movimento, onde a variável φ é a constante de fase ou ângulo de fase que está relacionado com a velocidade no tempo zero e a distância percorrida pela partícula. A variável ω da equação (2) é a velocidade angular que determina a velocidade com que os ciclos acontecem, determinado como (HALLIDAY et al., 2009)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ ou } 2\pi f. \quad (2)$$

Além da equação (1) para se definir um movimento harmônico simples também existem a equação

$$u(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) \quad (3)$$

onde $a = x_m \cos(\varphi)$, $b = -x_m \sin(\varphi)$ e a equação

$$u(t) = e^{i\omega t} (C e^{-ikx} + D e^{ikx}) \quad (4)$$

onde C, D são as amplitudes das pressões acústicas da onda incidente, refletida e i é a componente imaginária;

2.5. Ondas sonoras planas

Para o estudo das ondas planas será utilizado como principal fonte de referências o trabalho de Bistafa (2018).

Quando o diapasão da Figura 3 vibra, as partículas ao seu redor recebem esse movimento e a frequência, mas não se deslocam, somente

transmitem essa energia de uma partícula para a outra através da colisão entre elas. Essa transmissão em forma de uma onda da perturbação do ar é chamada de onda sonora.

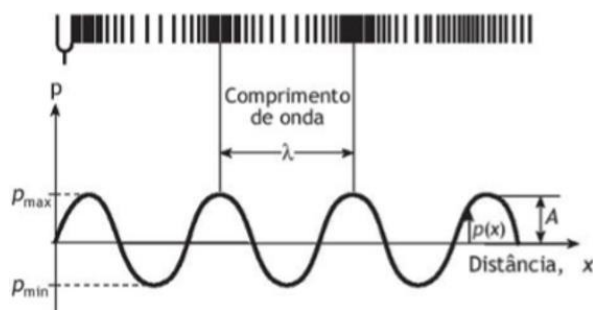


Figura 3 - Propagação de uma onda sonora gerada por diapasão.

Fonte: Bistafa, 2018

O comportamento de uma onda se propagando pelo ar também pode ser representado por uma função cossenoidal, como

$$p(x) = x_m \cos(kx) \quad (5)$$

em que tem em suas variáveis o número de onda que é definido pela equação

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (6)$$

e o comprimento de onda representado pela equação

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7)$$

onde $p(x)$ é a pressão sonora, c é a velocidade do som e f é a frequência.

Portanto, com o número de ondas e a amplitude é possível chegar ao valor da pressão do ar em cada ponto, também conhecido como comportamento espacial da pressão sonora.

A partir de uma combinação entre a equação (1) com a (5) a equação

$$p(x) = A \cos(\omega t \pm kx + \varphi) \quad (8)$$

determina o comportamento temporal e espacial da pressão sonora de um tom puro.

2.6. Tubos acústicos

Podemos gerar ondas estacionárias dentro de tubos a partir do efeito de reflexão que acontecerá nas extremidades dele, isto ocorre até quando a extremidade esteja aberta, embora, nesse caso, a reflexão não seja tão completa. Um requisito para que essas ondas sejam geradas é que sua frequência deve ser igual a frequência de ressonância do tubo. Esse tipo de onda estacionária tem a vantagem de gerar uma oscilação com amplitude maior, produzindo assim uma onda sonora audível. (HALLIDAY et al., 2009)

Existem os tubos aberto e os fechados, sendo que os fechados a sua extremidade funcionam como um nó e na extremidade dos tubos abertos funciona como uma corda presa a um anel que se movimenta livremente.

SEÇÃO II

Nesta seção serão abordados conceitos relativos ao comportamento de ondas se propagando no ar.

2.7. Superposição e Interferência entre ondas

Para o estudo da superposição e interferência entre ondas será utilizado como principal fonte de referências o livro do Halliday et al (2009).

O mais comum de acontecer na natureza é que várias ondas sonoras sejam emitidas de diferentes fontes e acabem chegando ao receptor ao mesmo tempo, acontecendo uma combinação entre elas. Essa soma pode ser representada como

$$u'(x, t) = u_1(x, t) + u_2(x, t) \quad (9)$$

em está sendo realizada a soma de duas ondas, mas que pode ser extrapolada para mais ondas, o que é o chamado de princípio de superposição.

A soma das ondas gera uma resultante que varia de acordo com a frequência angular, número de onda, comprimento de onda, fase relativa entre ondas e a amplitude. Se todos os outros parâmetros forem iguais e suas fases

se coincidirem, a onda resultante terá como amplitude a soma entre elas, o que é chamado de interferência construtiva, mas se estiverem defasadas essa onda será nula. Essas ondas estão representadas na Figura 4.

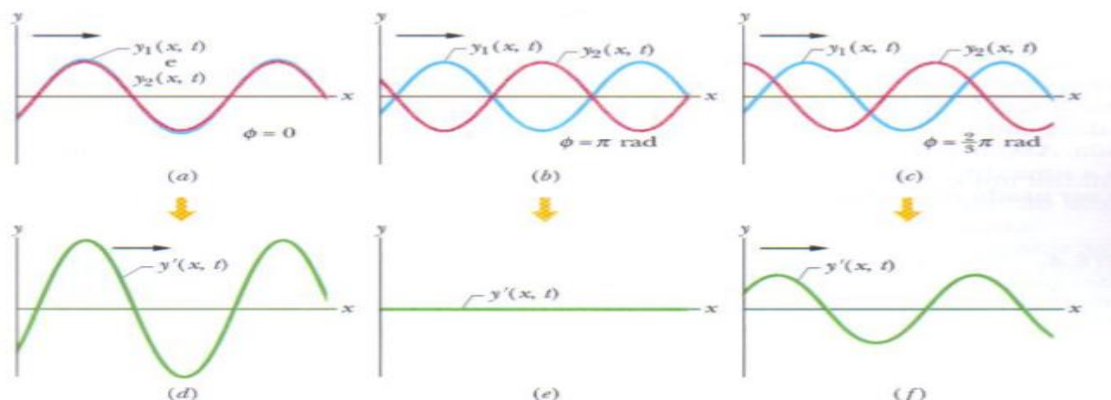


Figura 4 - Superposição e Interferência entre ondas

Fonte: Halliday et al., 2009

Segundo o princípio da superposição (9) se for combinado duas ondas defasadas de φ ou se sua diferença de fase for φ podemos somá-las como na equação

$$u'(x, t) = \left[2x_m \cos \frac{1}{2}\varphi \right] \sin(kx - \omega t + \frac{1}{2}\varphi) \quad (10)$$

que fez uso da equação (8) e da soma dos senos de dois ângulos diferentes.

2.8. Ondas estacionárias

Se as ondas estiverem se deslocando em sentidos opostos, a equação (9) ainda é válida, a Figura 5 representa esses tipos de soma de ondas sendo elas senoidais de mesma amplitude e mesmo comprimento de onda.

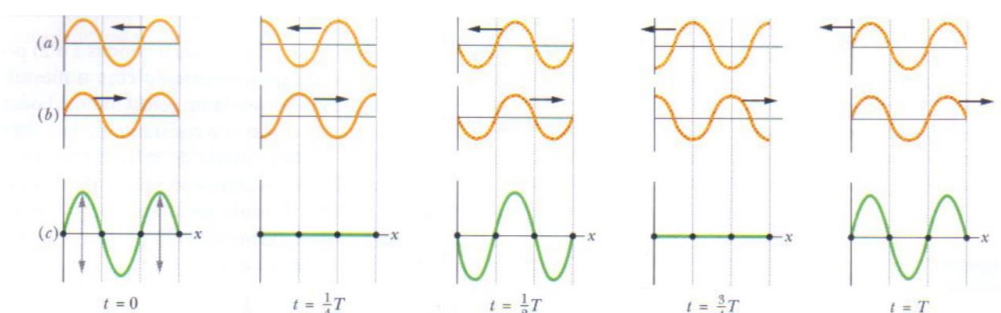


Figura 5 - Soma de ondas se deslocando em sentidos opostos

Fonte: Halliday et al., 2009

A parte c da Figura 5 mostra o resultado entre as duas ondas, sendo que existem pontos nela chamados de nós, eles são fixos e no ponto médio, entre os nós temos os anti nós que é um ponto de máxima amplitude. Além disso essas ondas representadas em c são chamadas de estacionárias, pois sua forma não se desloca para a direita nem para esquerda e o ponto de máximo e mínimo de sua amplitude não altera suas posições com o tempo (HALLIDAY et al., 2009).

A equação

$$u'(x, t) = [2x_m \sin kx] \cos \omega t \quad (11)$$

representa a soma das ondas

$$u_1(x, t) = x_m \sin(kx - \omega t) \quad (12)$$

e

$$u_2(x, t) = x_m \sin(kx + \omega t). \quad (13)$$

onde a equação (11) representa uma onda estacionária.

2.9. Impedância acústica específica da onda plana

É uma relação entre a pressão acústica em um meio e a velocidade com que as partículas oscilam. Essa grandeza varia de acordo com o meio e o tipo da onda. Para ondas planas essa propriedade física é representada na equação (GERGES, 2000).

$$Z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (14)$$

onde Z é a impedância acústica específica; ρc é a impedância característica do meio de propagação; ρ e c tem mais importância na acústica juntas do que como propriedades individuais.

Esta impedância específica é um valor real para as ondas planas progressivas enquanto para os outros tipos de onda a impedância possui valores complexos como em

$$Z = \frac{p}{v} = r_a + ix_a, \quad (15)$$

onde r_a é a resistência acústica específica e x_a é a reatância acústica específica.

2.10. Reflexão e refração do som

Para o estudo da reflexão, refração do som e absorção acústica será utilizado como principal fonte de referências o trabalho do Costa (2003).

A propagação da onda sonora de um meio para outro gera efeitos que fazem com que uma parte da onda seja refletida, outra refratada e a última parte entre no próximo meio, portanto, absorvida por ele. Essa interação entre os meios de propagação da onda pode ser descrita como

$$I_i = I_r + I_\alpha + I_t \quad (16)$$

ou ainda

$$\frac{I_r}{I_i} + \frac{I_\alpha}{I_i} + \frac{I_t}{I_i} = r_r + \alpha + t = 1 \quad (17)$$

que resultará nos coeficientes de reflexão e absorção. Onde I_i é a intensidade energética incidente, I_r é a intensidade energética refletida, I_α é a intensidade energética absorvida, I_t é a intensidade energética refratada, r_r é o coeficiente de reflexão, α é o coeficiente de absorção e t é o coeficiente de transmissão.

Considerando que o segundo meio que o som se propagou seja ilimitado temos que toda a energia sonora se transforma em calor e caso contrário, um meio com espessura limitada temos que parte dessa energia é convertida em ondas refratadas.

Em locais fechados as fontes sonoras transmitem parte de sua energia que não é refletida para suas paredes que vibram como lâminas engastadas nas bordas.

Assim, a energia que não é refletida será aparentemente absorvida pelo material, sendo denominado como coeficiente aparente de absorção, que é muito diferente do coeficiente real de absorção.

Considerando uma onda primária que chega da esquerda atingindo uma parede plana. Na Figura 6 a direção de incidência da onda faz um ângulo ϑ em relação a normal da parede e é refletida com o mesmo ângulo (KUTTRUFF, 2006).

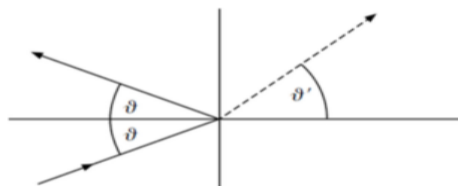


Figura 6 - Onda sonora incidindo sobre anteparo

Fonte: Kuttruff, 2006

A parede pode separar dois meios de propagação diferentes, sendo a onda que a atravessa chamada de refratada e normalmente prossegue com um ângulo diferente. Ambos os ângulos são relacionados por

$$\frac{c}{\sin \vartheta} = \frac{c'}{\sin \vartheta'} \quad (18)$$

onde c e c' são as velocidades do som à esquerda e a direita respectivamente

2.11. Absorção acústica

Quando ondas sonoras são incididas em um material, este absorve parte da onda, transformando-a em energia térmica, sendo que o quanto de energia absorvida por este material depende exclusivamente de suas características.

Os materiais com capacidade de absorver grande parte da energia das ondas sonoras são do tipo fibrosos, como lã de vidro, de rocha e materiais porosos como espumas de poliuretano, tecidos, feltros, plásticos porosos, madeira aglomerada etc.

Considerando que esses poros presentes no material sejam pequenos, de modo que a resistência proporcionada ao movimento de vibração das partículas que o atinge seja desprezada só restando a resistência resultante da viscosidade do movimento das partículas que interagem com as paredes dos poros, pode-se teoricamente ser demonstrado na equação

$$\alpha = 1 - \frac{2M^2 - 2M + 1}{2M^2 + 2M + 1} \quad (19)$$

e

$$M = \frac{2}{r} \sqrt{\frac{\mu}{2\pi f \rho}} \quad (20)$$

onde r é o raio do poro, μ é o coeficiente de viscosidade do ar, f é a frequência e ρ é a massa específica.

A expressão (19) no entanto só é válida quando praticamente toda energia sonora é absorvida pelo material.

Portanto o tamanho dos poros presentes no material absorvente é de grande importância para se definir as propriedades absorventes do material em função da frequência.

Para poros com diâmetro na ordem de milímetros, a proporção da onda refletida é maior, diminuindo a quantidade que é absorvida, resultando em coeficientes de absorção menores do que os esperados.

Outros parâmetros que também são importantes para determinar o valor do coeficiente de absorção dos materiais são a frequência, fracionamento, espessura, pintura da superfície, disposição adotada entre outros.

2.12. Ruído branco e ruído rosa

Esses tipos de sons são aleatórios e de banda larga. O ruído branco tem como característica um nível regular em cada frequência do espectro. Já quando esse nível diminui 3 dB por oitavas ele é chamado de ruído rosa (BISTAFA, 2018).

Quando se quer realizar ensaios acústicos os sons mais utilizados são algum desses dois tipos. Esses experimentos fazem a utilização de um aparato para gerar sinais com as características desses sons, que são transmitidos para um alto-falante que o reproduz, o qual interage com os objetos sobre o teste. Para determinar a função de transferência é utilizado o ruído branco (BISTAFA, 2018).

2.13. Distinção entre absorção e isolamento acústico

Para conceituar a diferença entre absorção e isolamento acústico será utilizado como principal fonte de referências o trabalho de Bistafa (2018).

Quando se deseja determinar o desempenho acústico de materiais ou estruturas, as características mais relevantes para isso são as capacidades de

ele absorver e de isolar o ruído. No entanto, essas duas propriedades são corriqueiramente confundidas.

A absorção acústica é empregada principalmente quando se deseja determinar o grau de reverberação de um material ou espaço. Embora essa absorção faça com que o ruído seja reduzido, essa redução é de somente alguns decibéis. No entanto, esse tratamento acústico gera a sensação de que os níveis de ruído foram diminuídos, o que não reflete nas medições objetivas. Assim, essa propriedade não deve ser a principal característica analisada quando o esperado é um isolamento acústico, exclusivamente quando o nível do ruído for alto.

Os materiais com alto índice de absorção são em geral pouco densos para permitir que as ondas sonoras penetrem neles mais facilmente e em seus interiores perdendo energia. No entanto, essa propriedade é pouco efetiva no isolamento do som.

A perda de transmissão é a principal característica quando se deseja realizar o isolamento acústico de um recinto. Essa propriedade é maior quanto mais denso e reflexivo for o material.

Mas a combinação dessas duas características é possível, realizando a adição de materiais absorvente, fibrosos ou porosos em uma parede isolante. Acusticamente essa união gera estruturas chamadas de compostas.

SEÇÃO III

Essa seção contém as características do tubo de impedância inclusive seus diferentes tipos, funcionalidades, expressões matemáticas envolvidas nos calculos das propriedades dos materiais que ele mede, seu dimensionamento e os softwares que ele utiliza.

2.14. Tubos de impedância presentes no mercado

A empresa Brüel & Kjær seguindo as normas ISO 10534-2, ASTM E1050-12 e ASTM E2611-17 comercializa três tipos diferentes de tubos de impedância presente na Quadro 1 com a seguinte característica:

Método de função de transferência de dois microfones:
Kit de Tubo de Impedância (50 Hz - 6,4 kHz) Tipo 4206
Kit de Tubo de Impedância (100 Hz - 3,2 kHz) Tipo 4206-A
Método de função de transferência de quatro microfones:
Kit de Tubo de Perda de Transmissão (50 Hz - 6,4 kHz) Tipo 4206-T

Quadro 1 - Tubos de impedância comercializados pela empresa Brüel & Kjaer

Fonte: Brüel & Kjær, 2019

Grande parte dos tubos de impedância funcionam com frequências entre 50Hz e 8000 Hz, fazer uso de outras frequências pode resultar em erros na medição. Mesmo assim, não é viável se trabalhar com todas essas frequências. (BUSULO, 2018)

O tubo de impedância pode ser construído de formas diferente. A ISO 10534-2 descreve como construir um tubo utilizando dois microfones e também somente um, alterando sua posição de lugar. Já a ASTM E2611-17, especifica como deve ser feito um tubo de impedância usando quatro microfones.

2.15. O método da função de transferência de dois microfones

Para uso desse método, é necessário posicionar a fonte sonora em uma extremidade e a amostra na outra. A fonte sonora gerará ondas sonoras que se propagaram no interior do tubo o qual fará que essas ondas se propaguem de maneira plana, atingindo o fundo do tubo onde estará posicionado a amostra e posteriormente refletida. O conjunto formado pelo contato, reflexão e propagação da onda formará um padrão de interferência em razão da superposição das ondas que se movem para frente e para trás no interior do tubo. Fixando os microfones em duas posições para a verificação da pressão sonora nesses pontos e fazendo o uso do cálculo da função de transferência complexa através de um analisador de frequência, se definirá os coeficientes de absorção sonora e reflexão complexa e a impedância acústica da amostra

escolhida. A Figura 7 representa como esse tubo é feito (BRÜEL & KJAER, 2019).

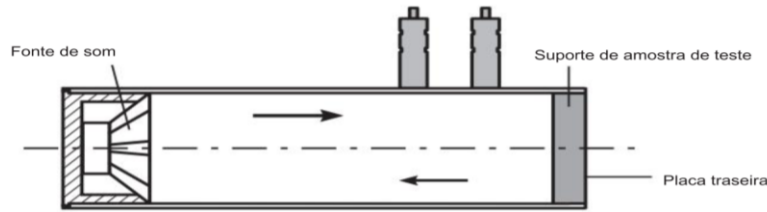


Figura 7 - Representação tudo de impedância com dois microfones

Fonte:Brüel & Kjær, 2019

2.16. Função de transferência

Esta função é definida como

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} \text{ ou } \frac{S_{11}}{S_{12}} \text{ ou } \left[\left(\frac{S_{12}}{S_{11}} \right) \cdot \left(\frac{S_{22}}{S_{21}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

se fazendo necessária para o cálculo do fator de reflexão calculada pela equação (27), fazendo uso do espectro cruzado definido pela função determinada pela equação

$$S_{12} = P_2 \cdot P_1^* \quad (22)$$

e pelo espectro automático definido pela equação

$$S_{11} = P_1 \cdot P_1^* \quad (23)$$

onde H_{12} é a função de transferência, P_2 é a pressão sonora no ponto 2, P_1^* é o conjugado complexo da pressão sonora no ponto 1, P_1 é a pressão sonora no ponto 1 e P_1^* é o conjugado complexo da pressão sonora no ponto 1 (ISO 10534-2, 1998).

2.17. Coeficiente de absorção pela função de transferência

A pressão captada pelos microfones calculada pela equação

$$p(x) = p_i(x) + p_r(x) = Ce^{-ikx} + De^{ikx} \quad (24)$$

é a soma entre a pressão incidente e a pressão refletida, onde $p_i(x)$ é a pressão incidente, $p_r(x)$ é a pressão refletida e C, D são as amplitudes das pressões acústicas da onda incidente e refletida representado na equação

$$r_r = \frac{C}{D} \quad (25)$$

e (27) é igual à razão das amplitudes da pressão sonora da onda refletida e incidente (LABASOVA & DURIS, 2019).

O fator de reflexão é considerado um número complexo quanto à possibilidade de deslocamento de fase das ondas.

O coeficiente de absorção acústica é calculado pela equação

$$\alpha = 1 - |r_r|^2 \quad (26)$$

que depende do fator de reflexão. Ambos são quantidades adimensionais e seus valores variam entre 0 e 1.

Caso o material absorva toda a energia incidente, o coeficiente de absorção acústica é 1 ($r = 0$). Materiais de estrutura porosa ou fibrosa são recomendados para absorção do som.

Caso o material reflita perfeitamente todas as ondas sonoras incidentes da superfície, o coeficiente de absorção acústica é 0 ($r = 1$) (LABASOVA & DURIS, 2019).

Outra maneira de calcular fator de reflexão a partir da função de transferência está representado na equação

$$r = r_r + ir_i = \frac{H_{12} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}} \cdot e^{2ik(s+x_2)} \quad (27)$$

onde i é o componente imaginário, x_2 é a distância entre a amostra e o microfone localizado na posição 2, k é o número de onda, s é a distância entre os microfones e H_{12} é a função de transferência entre as posições 1 e 2.

O número de onda é uma função complexa, então deverá ser calculado pela equação

$$k = k_0' - ik_0'' \quad (28)$$

onde k_0' é a componente real representada na equação (28), ik_0'' é a componente imaginária que é a constante de atenuação, em nepers por metro

2.18. Caixa acústica

Devido a orientações sugeridas pela ISO 10534-2 (1998) foi confeccionada uma caixa acústica a qual será a responsável por gerar o campo acústico que se formará dentro do tubo de impedância, além de deixar a fonte sonora fixada à caixa e não ao tubo, pois segundo a ISO 10534-2 (1998) se essa

ligação for direta pode gerar ressonância podendo, desta forma surgir erros e incertezas na medição (BUSULO, 2017).

Para determinar o tipo da caixa acústica, entre selada ou dutada, SMALL (1972) desenvolveu a expressão

$$EBP = \frac{Fs}{Qes} \quad (29)$$

conhecido como Efficiency Bandwidth Product (EBP). Onde Fs é a frequência de ressonância e Qes é o fator de qualidade elétrica

Para volume da caixa acústica foi utilizado o cálculo apresentado por (NEGRI, 2008)

$$Vb = \frac{Va}{\alpha_a} \quad (30)$$

onde Vb é o volume da caixa, Va é o volume equivalente do alto falante, α_a é a razão entre as compliâncias.

A razão entre as compliâncias é deduzida pela equação

$$\alpha_a = \left(\frac{Qtc}{Qts} \right)^2 \quad (31)$$

onde Qtc é o fator de qualidade da caixa, Qts é dado pelo fabricante e dependerá da resposta desejada. Para resposta plana utiliza-se 0,707.

2.19. Diâmetro do tubo

Para determinar o diâmetro do tubo de impedância é utilizado a equação

$$d < 0,5\lambda_u; f_u \cdot d < 0,50c \quad (32)$$

que tem como uma de suas variáveis a frequência, assim mostrando a dependência direta entre ela e o diâmetro do tubo onde f_u é o limite de frequência superior, em Hz; c é a velocidade do som; d é o diâmetro do tubo (ISO 10534-2, 1998).

Essa razão entre frequência superior e diâmetro assegura que dentro do tubo haja somente propagação de ondas planas.

Primeiro será arbitrado o diâmetro do tubo para ter como referência e a partir desse valor é possível determinar a faixa de frequência operacional do tubo representado na expressão

$$f_i < f < f_u \quad (33)$$

que depende das características geométricas do tubo, sendo que f_i é o limite de frequência inferior, em Hz; f é a frequência de operação, em Hz; f_u é o limite de frequência superior, em Hz (LARCHER & WACHHOLZ, 2018).

Para determinar o limite de frequência inferior Melo *et al.*, (2010) utiliza a equação

$$f_i > \frac{c}{2 \cdot L} \quad (34)$$

onde L é o comprimento do tubo, c é a velocidade do som.

2.20. Distância entre microfones

Esse espaçamento corresponde a um dos fatores que pode aumentar o grau de precisão do experimento, quanto maior a distância entre os microfones maior a precisão dos testes (LARCHER & WACHHOLZ, 2018).

Deve ser observado se o valor adotado é menor do que metade do valor do comprimento das ondas estacionárias como indicado na equação (LARCHER & WACHHOLZ, 2018)

$$s = \frac{\lambda}{2} \quad (35)$$

Além disso, essa distância não pode ser superior a 80% do valor resultante da equação (LARCHER & WACHHOLZ, 2018)

$$s_{max} = \frac{c}{2 \cdot f_u} \quad (36)$$

E a fim de prevenir problemas com interferência na propagação da onda, como a geração de ondas não planas no interior do tubo. O espaçamento necessário entre a fonte sonora e o primeiro microfone não pode ser inferior a 3 vezes o diâmetro do tubo. O espaçamento da amostra e o último microfone, definindo que a superfície da amostra seja plana, deve ser superior ou igual a 2 vezes o diâmetro do tubo (BUSULO, 2017).

2.21. Microfone

O tipo de microfone mais utilizado para medições acústicas é o condensador, por exibirem resultados planos em uma variedade alta de

frequências. Esse tipo de microfone necessita de um pré-amplificador para ampliar o sinal detectado por eles (SOUSA & LIMA, 2015).

A recomendação em relação ao diâmetro do microfone é que ele não ultrapasse a marca de 20% do comprimento da onda de acordo com sua maior frequência representado pela equação (LARCHER & WACHHOLZ, 2018)

$$dm < 0,2 \cdot \lambda. \quad (37)$$

2.22. Fixação do microfone

É importante que eles estejam posicionados o mais rente possível da parte interna do tubo, para diminuir as imperfeições em seu interior e não provocarem importantes modificações na medição (BUSULO, 2017; LARCHER & WACHHOLZ, 2018).

2.23. Suporte para o tubo

É necessário que o tubo esteja bem preso, localizado em uma superfície plana e seu corpo esteja de forma concêntrica à fonte sonora para isso.

2.24. Amostras

As amostras escolhidas devem estar entre as mais utilizadas, serem acessíveis no mercado e que suas características acústicas já estejam bem definidas, assim mostrando uma real relevância dos futuros resultados (LARCHER & WACHHOLZ, 2018).

2.25. Terminação do tubo

A extremidade oposta à fonte sonora será fechada por um material que permita uma reflexibilidade dentro do tubo.

2.26. Porta amostras

As amostras serão fixadas na extremidade do tubo por uma peça que permita tanto tampar o tubo quanto posicionar a amostra (MELO et al., 2010).

2.27. Softwares

O software utilizado tanto por Busulo (2017) e Larcher & Wachholz (2018) é um toolkit de MATLAB (ITA-Toolbox) que será o responsável por

processar os dados coletados pelo microfone e a partir daí calcular a impedância acústica.

Sobre o ITA-Toolbox:

Informações colhidas no site do toolbox (ITA-TOOLBOX, 2022, tradução própria):

- “Caixa de ferramentas MATLAB de código aberto para acústica desenvolvida pelo Instituto de Acústica Técnica da RWTH Aachen University.
- Conceitos de programação orientada a objetos para facilitar o manuseio e aquisição de dados de áudio e simulação.
- Inclui interfaces gráficas de usuário e várias rotinas de plotagem para a saída gráfica de todos os tipos de dados acústicos relevantes.
- Inclui tutoriais e demonstrações para começar rapidamente.”

3. METODOLOGIA

Para melhor compreensão, será dividida em três seções como mostrado na Figura 8, onde foi utilizado os dimensionamentos propostos na seção III expostos na revisão bibliográfica para cada uma das partes correspondentes.

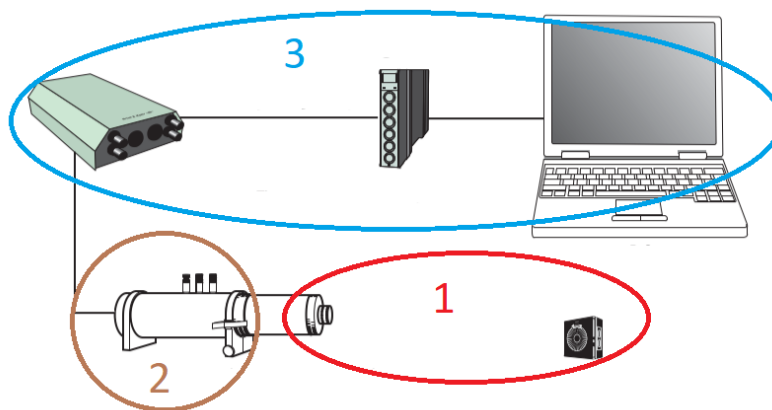


Figura 8 - Representação das seções da metodologia

Fonte: Brüel & Kjaer (modificado), 2019

Na primeira seção será definido o modelo do alto falante utilizado, as dimensões que foram empregadas e como foi feito a caixa acústica.

Com isso, a segunda seção inicia com a definição do microfone que estará fixo no tubo de impedância. Assim possibilitará dimensionar o tubo para suas medidas. Foi determinado a distância entre os microfones, o comprimento do tubo, como será feito a fixação dos microfones no tubo, qual será a amostra ensaiada e como será fixada dentro do tubo. Após todas as etapas definidas foi mostrado como se deu a construção do tubo.

Posteriormente, a Seção III discute o layout da ferramenta ITA-Toolbox utilizada, sua instalação e a realização das medições.

SEÇÃO I

3.1. Caixa acústica

A fonte sonora escolhida foi o alto-falante da marca Champion, modelo Trx 500 que tem um diâmetro de 12,7mm e demais configurações técnicas estão presentes na Tabela 1.

Potência nominal	50 WRms
Impedância	4 ohms
Resposta de frequência	70Hz a 20kHz
Frequência de ressonância (Fs)	70Hz
SPL	89 db/W/m
Fator de qualidade total do alto falante (Qts)	0,96
Fator de qualidade elétrico (Qes)	1,3
Fator de qualidade mecânico (Qms)	3,8
Volume equivalente do alto falante (Vas)	9
Deslocamento máximo do cone (Xmax)	1,5
Área efetiva do cone (Sd)	95
Volume máximo deslocado (Vd)	14,2

Tabela 1- Ficha técnica do alto-falante

Fonte: Champion (adaptada) 2022

A ligação do alto falante ao computador se deu através do amplificador da *Figura 9*. E a *Tabela 2* contém as especificações técnicas dadas pelo fornecedor.



Figura 9 Amplificador Mono 10w Rms 12v Tda2003 - Modelo 2019

Fonte: Mercado livre

Especificações.	
Alimentação típica:	12 volts
Modelo:	A-POWER 2003
Alimentação:	12V DC
Potência MAX:	10W RMS
Aplicação:	Caixas amplificadas, pequenos projetos etc.
Função:	Amplificador de áudio

Tabela 2 - Especificações técnicas do amplificador do alto falante

Fonte: (adaptado) Mercado livre

Para a alimentação foi utilizado uma fonte de 5 volts obtida a partir de um carregador de celular. Onde foi colocado nos pinos DC 12V da placa do amplificador.

No OUT foi colocado o alto falante, sendo que no alto falante foi soldado um fio de cobre vermelho para a parte positiva e um fio preto para a parte negativa.

No INPUT foi colocado inicialmente um plug P2 onde um cabo de cobre preto foi conectado a carcaça do plug e conectado na parte negativa do amplificador, também um cabo vermelho foi soldado a parte positiva do plug e na parte positiva do amplificador.

De acordo com as características do alto falante, presentes na Tabela 1, utilizou-se a equação (29), encontrando um EBP de 53,85 que é o utilizado para caixas fechadas.

A partir da equação (30), foi definido que a caixa será 30x30x30cm sendo que 5 peças iguais formam a caixa.

A tampa da caixa foi feita a partir do mesmo material das outras peças e possui um furo no centro para comportar o alto falante.

O primeiro passo foi fazer um protótipo, a caixa acústica ficaria o que está representado na Figura 10. Foi utilizado papelão no lugar da madeira compensada. Tudo foi colado com cola quente. Já a parte onde é fixada o alto falante primeiro foi feita uma marcação do meio da peça e então foi posicionado o alto falante em cima dessa marcação e foi feito o desenho da sua

circunferência para posterior corte. Ademais, foi fixado alto falante ao papelão com parafusos.



Figura 10 Protótipo da caixa acústica

A partir da definição de como seria feita toda a parte da caixa acústica foi realizado uma visita à loja onde se venderia a placa de madeira para realizar os cortes para a confecção da caixa acústica. No entanto o valor da placa estava muito elevado além de não possuir os equipamentos necessários para realizar o corte no material. Então, após a busca por uma loja especializada em equipamentos acústicos com o protótipo, onde seria realizado essa etapa de corte e fixação no material deles com o resultado representado na *Figura 11*.



Figura 11 Caixa acústica

SEÇÃO II

3.2. Microfone

Foi confeccionado o circuito elétrico para um microfone de eletreto possibilitando iniciar os primeiros testes no programa que se realizará as medições. Assim foi encomendado os microfones de eletreto mostrado na Figura 12, possuindo dois fios mini com espessura de 3mm e diâmetro de 6mm.



Figura 12 Microfone de eletreto

Na Figura 13 temos o modo de se ligar esse circuito com um resistor cujo valor depende da tensão de alimentação, mas que tipicamente está entre 1k ohm e 10k ohm.

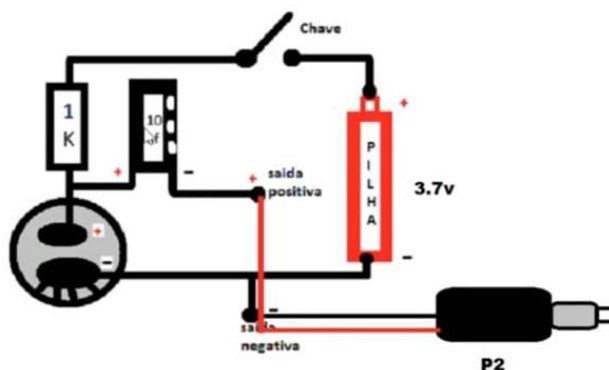


Figura 13 - Representação dão do circuito para ligar o microfone de eletreto

Fonte

*[youtube.com/watch?v=1SEcVlf_bmA&list=LL&index=35&t=9s&ab_channel=na
medid](https://www.youtube.com/watch?v=1SEcVlf_bmA&list=LL&index=35&t=9s&ab_channel=na%20medid)*

Os resistores e capacitadores necessários foram removidos de fontes de computadores antigos. Para a fonte foi utilizado uma bateria retirada de um multímetro. Então o primeiro protótipo da Figura 14 foi feito utilizando uma

protoboard para ligar todos os componentes, por conta da facilidade em substituir os componentes caso não desse certo.



Figura 14 - Protótipo do microfone de eletreto

No entanto esse sistema com a protoboard não funcionou então foi feita a ligação direta entre todos os componentes como o esquema da Figura 13. O que também não deu certo, como alternativa foi utilizado um amplificador de microfone da Figura 15 retirado de um aparelho de DVD.



Figura 15 - Amplificador de microfone retirado do DVD

Onde foi conectado uma fonte de 5 volts, o microfone construído e um cabo do tipo P10 de saída. Posteriormente esse esquema todo foi conectado à caixa de som e assim o microfone respondeu aos sons gerados.

Então para simplificar o esquema, foi adquirido um amplificador de microfone da Figura 16. Onde suas especificações técnicas estão presentes na Tabela 3.



Figura 16 - Pré Amplificador Para Microfone Dinâmico 2 Canais

Fonte: Mercado livre

Especificações:	
Tensão de alimentação:	de 3,7 vdc a 15 vdc
Canais:	2
Dimensões da placa:	3,2cm x 2cm
Observações:	
1 – Como o consumo de energia é muito pequeno, recomendamos o uso de bateria ou pilhas para alimentar a placa	
2 – Se você usar apenas um microfone, o outro canal deve ser curto-circuitado com a entrada gnd, com o fim de evitar interferências crosstalk.	

Tabela 3 - Especificações técnicas do amplificador do microfone

Fonte: Tabela adaptada do mercado livre

Sendo a alimentação desta vez feita por pilhas da Figura 17, utilizadas para controle de portão elétrico onde fornecem 12 volts ao sistema, o que é necessário para o amplificador.



Figura 17 - Pilhas de 12V

Fonte: shopee.com.br/Bateria-Elgin-Alcalina-12V-A23-1-unidade%281-pilha%29-i.329184199.6379342429

Então foi ligado o amplificador como na Figura 19 e o microfone como na Figura 18 a duas pilhas dessas.



Figura 18 - Microfone alimentado

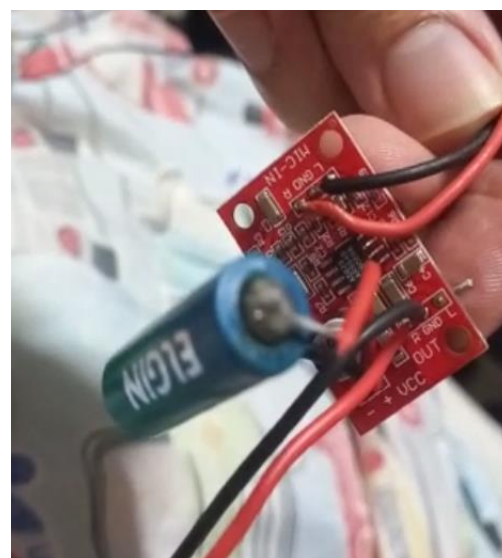


Figura 19 - Pré amplificador alimentado

Por fim também foi solicitado ao IFG campus Goiania dois microfones PCB Piezotronics, modelo 130E22 com $\phi = 1/4"$, com pré-amplificador integrado, representado na Figura 20. Suas principais características são:

- Sensibilidade: 45 mV/Pa (-26,9 dBV, sendo 0 dBV=1V/Pa);
- Faixa de frequência: 20 –10.000 Hz;
- Faixa dinâmica: 122 dB.



Figura 20 - PCB Piezotronics, modelo 130E22

Fonte: PCB

Onde em visita ao instituto de Goiânia foi orientado a realizar a calibração dos mesmos utilizando o programa audacity¹ para captar o som recebido pelo microfone e um aplicativo de celular para gerar ondas de 400 hz.

Quando foram comparadas as ondas captadas pelos microfones foi visto que não geravam sinais iguais, onde foi constatado que o motivo foi a confecção do cabo P10 onde o cabo que foi comprado pronto gerava sinais consistentes, representados pela onda inferior da Figura 21, e o confeccionado manualmente variava muito o sinal, sendo esta variação mostrada na onda superior da Figura 21.

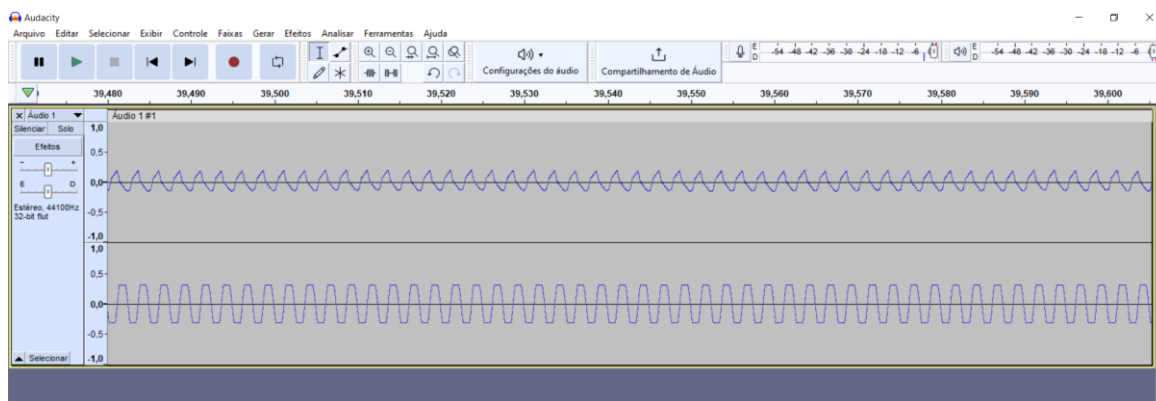


Figura 21 - Comparação entre as ondas sonoras captadas pelos microfones

3.3. Diâmetro do tubo

O diâmetro do tubo adotado foi o mesmo utilizado por Busulo (2017), de 50mm, pois de acordo com a equação (32) é necessário definir ou a frequência ou esse diâmetro para continuar o dimensionamento.

¹ Programa disponível no endereço: <https://www.audacityteam.org/download/>

Em posse do valor do diâmetro do tubo, utilizou-se a equação (32) para determinar o limite de frequência superior.

3.4. Distância entre microfones

Para tal medida foi utilizado a equação (11) e (36) resultando em um espaçamento máximo de 34,1 mm.

3.5. Comprimento do tubo

O comprimento total do tubo deve ser grande o suficiente para comportar os microfones e atender as exigências de espaçamento entre a fonte sonora e o primeiro microfone superior a 3 vezes o diâmetro do tubo e o espaçamento da amostra e o último microfone superior ou igual a 2 vezes o diâmetro do tubo. Atendendo esses critérios o tubo terá 485mm de comprimento como mostrado na Figura 22 sendo 200,5mm a distância da fonte sonora até o primeiro microfone e 250,5mm do segundo microfone até a amostra.

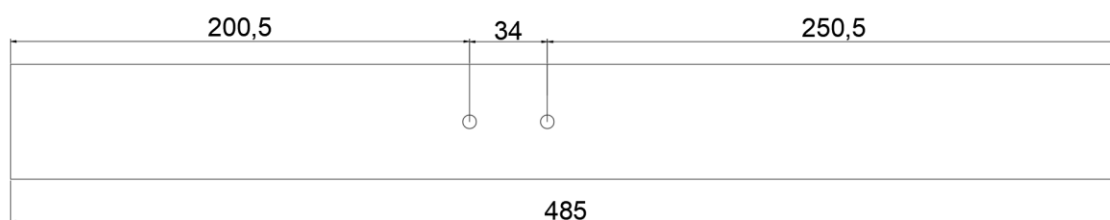


Figura 22 - Representação das dimensões do tubo

A partir do comprimento do tubo é possível verificar o limite de frequência inferior utilizando a equação (34) e assim determinar a faixa de frequência operacional do tubo.

Limite de frequência inferior:

$$f_i = 150\text{Hz}$$

Logo a faixa de frequência operacional do tubo será:

$$150 < f < 4000$$

3.6. Fixação do microfone

Os microfones foram presos por um prensa cabos com 1/8" polegadas de diâmetro. O prensa cabos será fixado junto ao tubo que terá aberturas levando em consideração seu diâmetro. A utilização desse equipamento possibilita ajustar a altura do microfone.

3.7. Confecção do tubo

Após o cálculo do seu tamanho foi feito o corte no tubo de PVC com o auxílio de um arco de serra mostrado na Figura 23.



Figura 23 - Corte no tubo de PVC

Para realizar os furos foi feita uma linha reta sobre toda a extensão do tubo e então foi feita a marcação das distâncias do furo até a ponta onde estará a fonte sonora, depois foi utilizado a distância calculada entre os microfones para fazer a segunda marcação do furo. Já com as marcações previamente feitas onde serão fixados os prensa cabos, foi utilizado uma furadeira com uma broca pequena, depois foi utilizado brocas maiores até atingir o diâmetro do prensa cabos que, em seguida, foi colado com uma cola própria para PVC (adesivo

plástico para PVC rígido). O resultado e os materiais utilizados foram mostrados na Figura 24.



Figura 24 - Confeção do tubo

Para posicionar o tubo foi feito dois suportes como na Figura 25 a partir da medição de qual seria a altura ideal para deixar o tubo centralizado com o alto falante. Também foi colocado o cap de PVC no final do tubo, onde será posicionado a amostra.



Figura 25 - Protótipo do tubo de impedância

Os responsáveis pela confecção da caixa acústica também ficaram responsáveis por confeccionarem o suporte onde o tubo seria posicionado mostrado na Figura 26 sendo feito do mesmo material que a caixa acústica.



Figura 26 - Suporte para o tubo

A conexão entre o tubo e o alto falante se deu através de uma bucha de redução soldável de PVC que posicionou o alto-falante concêntrico ao tubo.

O redutor hidráulico adquirido foi do tamanho DN100 para o DN 50 mostrado na Figura 27.



Figura 27 - Bucha redutora

Por fim toda a parte mecânica foi conectada como na Figura 28.



Figura 28 - Tubo de impedância montado

Durante a utilização dos prensa cabos eles se soltaram o que mostrou que a cola utilizada não seria o suficiente para segurá-los então foi feita uma nova colagem com superbonder e durepoxi mostrados na Figura 30 e também foi realizado a pintura com spray preto mostrados na Figura 29.



Figura 29 - Prensa cabos fixado

Figura 30 - Materiais para a colagem

3.8. Amostras

As amostras foram recolhidas a partir de uma placa sonex illtec que a empresa OWA sonex forneceu para a realização do trabalho onde ela está mostrada na Figura 31 e seu respectivo coeficiente de absorção na , a seleção se deu pelo fato do fabricante descrever todas características técnicas necessárias para iniciar as medições.

Por fim foi feito a marcação no material com o auxílio do tubo e foi cortado com tesoura, conforme exposto na Figura 31.



Figura 31 - Confecção da amostra

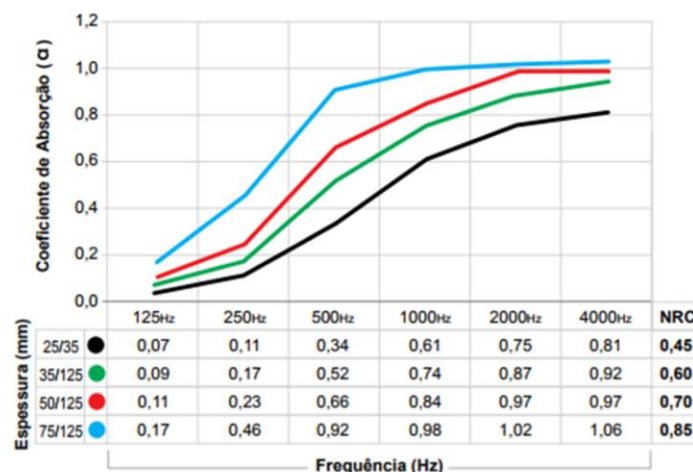


Figura 32 - Coeficiente de absorção sonora Sonex

3.9. Terminação do tubo e porta amostra

Um “cap” de PVC, demonstrado na Figura 33, foi fixado na extremidade do tubo com o tamanho equivalente ao diâmetro do tubo 50mm.



Figura 33 - Cap de PVC

3.10. Interface de áudio

Então com a caixa acústica e microfone funcionando, buscou-se um meio de conectar os dois ao notebook e o método encontrado foi a utilização de a Placa de Som USB da Figura 34.



*Figura 34 - Placa de Som USB 7.1 Canal Virtual Com 4 Portas Conexão P2
Para Microfone e Fone De Ouvido 4 Saídas*

Fonte: Mercado livre

- Interface USB 2.0
- Compatível com USB 2.0 Full Speed (12 Mbps)
- Amplia seu alto-falante ou fone de ouvido estéreo com canais surround 7.1 (canal virtual)
- Funciona em qualquer desktop ou notebook, alimentado via USB
- Possui teclas para controle: Ativar/Desativar microfone, Ativar/Desativar Volume
- Não necessita de driver de instalação para Windows 98 SE/Me/2000/XP/Server 2003/Vista/7/8/10
- Entrada para microfone e fone de ouvido

Tabela 4 - Especificações técnicas da placa de som

Fonte: (adaptado) Mercado livre

Então já com todos os componentes instalados foram feitos os primeiros testes no ITA-Toolbox. O matlab já mostrava uma mensagem de erro da Figura 35 logo quando se iniciava o plugin.

NO sound cards detected!

Figura 35 - Erro ao iniciar o ita-toolbox

Então deu-se início as medições, porém, mais erros apareceram. Assim, foi constatado que seria necessário a utilização uma interface de áudio. A interface da Figura 36 que foi adquirida a partir de um empréstimo do orientador Daniel.



Figura 36 - Interface de áudio Focusrite Scarlett 2i4 2ª geração

Fonte: Mercado livre

Logo após sua utilização a primeira mensagem de erro “No sound card detect” parou de aparecer. Possibilitando o programa a realizar as medições.

3.11. Tubo construído

Por fim a Figura 37 está mostrando o tubo de impedância construído com os microfones, interface de áudio e amplificadores, todos instalados.



Figura 37 - Tubo de impedância finalizado

SEÇÃO III

3.12. Busca pelo software

Foi realizada uma pesquisa no banco de dados no site da google com os seguintes termos “ita toolbox matlab”, o primeiro link encontrado direciona ao

site do *Institute of Technical Acoustics* (ITA) que disponibiliza ao fim da página um link para entrar no site do ita-toolbox.

Dentro do ita-toolbox é feita uma breve introdução das diversas possibilidades do programa em questão, suas capacidades e descrição dos tutoriais de como manusear o software disponível dentro do próprio programa e ainda, fornecem um link para download.

Após o programa baixado foi aberto o Matlab, dentro dele foi feita uma procura pelo arquivo do ita-toolbox onde estava presente o tutorial do programa.

3.13. Funcionamento do ita-toolbox

Para que o Matlab abra a ferramenta, é necessário encontrar a pasta onde ele foi instalado, como na Figura 38 e executar o arquivo com o nome “ita_toolbox_setup”.

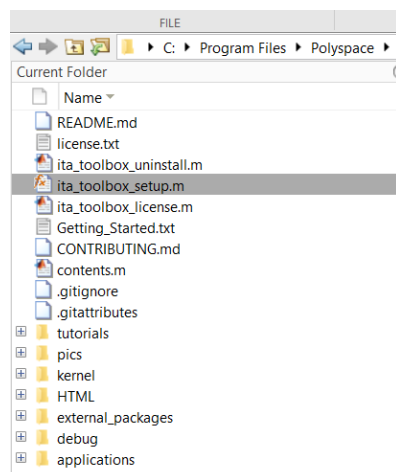
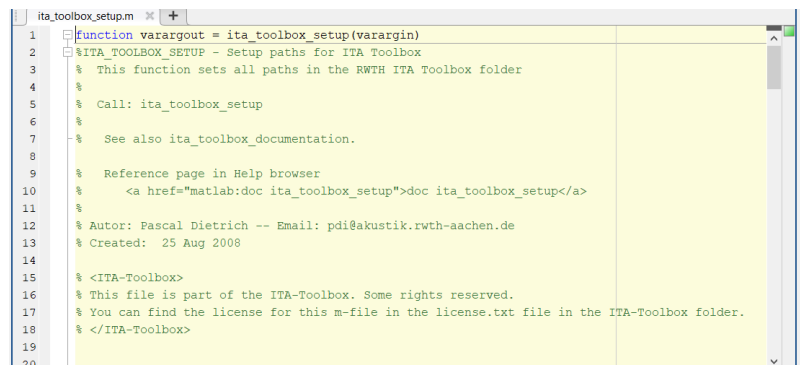


Figura 38 - Encontrando o setup dentro do matlab

Então será aberto a linha de programação mostrado na Figura 39 do programa em questão, sendo necessário dar o comando para que o Matlab execute a programação clicando em “Run”,



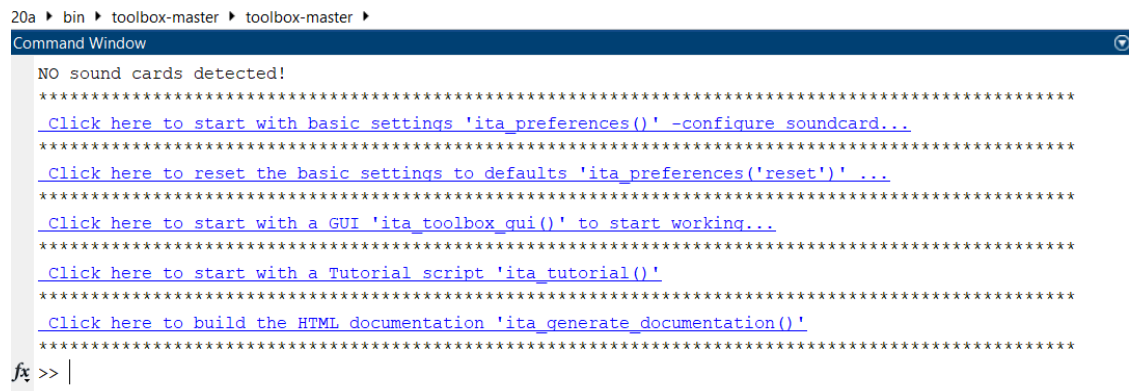
```

1 function varargout = ita_toolbox_setup(varargin)
2 %ITA_TOOLBOX_SETUP - Setup paths for ITA Toolbox
3 % This function sets all paths in the RWTH ITA Toolbox folder
4 %
5 % Call: ita_toolbox_setup
6 %
7 % See also ita_toolbox_documentation.
8 %
9 % Reference page in Help browser
10 % <a href="matlab:doc ita_toolbox_setup">doc ita_toolbox_setup</a>
11 %
12 % Autor: Pascal Dietrich -- Email: pdi@akustik.rwth-aachen.de
13 % Created: 25 Aug 2008
14 %
15 % <ITA-Toolbox>
16 % This file is part of the ITA-Toolbox. Some rights reserved.
17 % You can find the license for this m-file in the license.txt file in the ITA-Toolbox folder.
18 % </ITA-Toolbox>
19
20

```

Figura 39 - Linha de programação do ita-toolbox

Após o processamento, é disponibilizado cinco links mostrados na Figura 40.



```

20a bin toolbox-master toolbox-master
Command Window
NO sound cards detected!
*****
Click here to start with basic settings 'ita_preferences()' -configure soundcard...
*****
Click here to reset the basic settings to defaults 'ita_preferences('reset')' ...
*****
Click here to start with a GUI 'ita_toolbox_gui()' to start working...
*****
Click here to start with a Tutorial script 'ita_tutorial()'
*****
Click here to build the HTML documentation 'ita_generate_documentation()'
*****
fx >> |

```

Figura 40 - Pós processamento realizado pelo Matlab

Em “*configure soundcard*” é necessário estabelecer qual canal será utilizado para gerar o som e para receber o som, nas opções “*Recording Device*” e “*Playing Device*” da Figura 41.

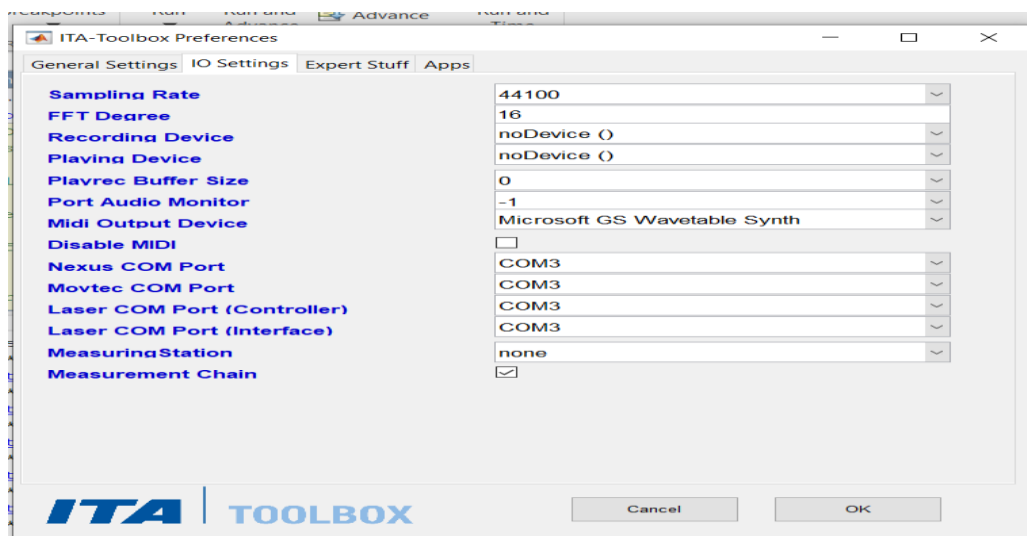


Figura 41 - Configure soundcard

3.14. Realizar as medições no ita-toolbox

Após a configuração da interface de áudio pode-se iniciar as medições clicando em “start working” da Figura 40, clicando em “measurement” como na Figura 42 e depois em “new measurement setup” como na Figura 43.

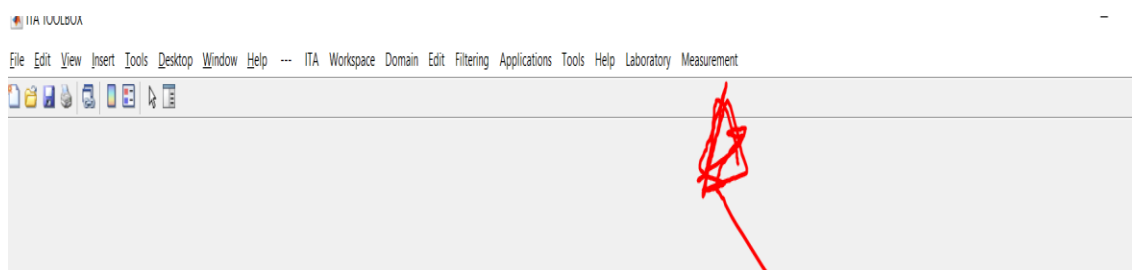


Figura 42 – Measurement

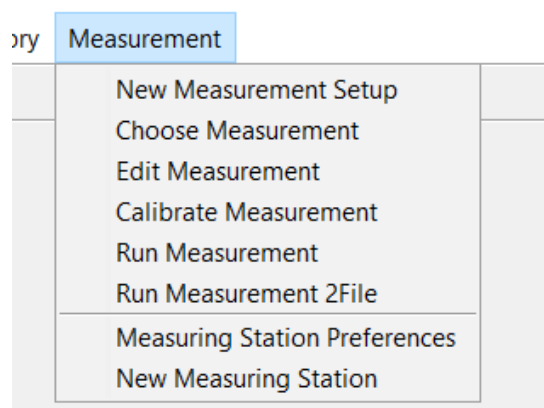


Figura 43 - New Measurement Setup

A ferramenta oferece quatro preferências de medições, mostradas na Figura 44, onde, após escolhido a opção desejada é aberto as alternativas de configuração para os parâmetros desejados, no qual todas as possibilidades estão mostradas na Figura 45.

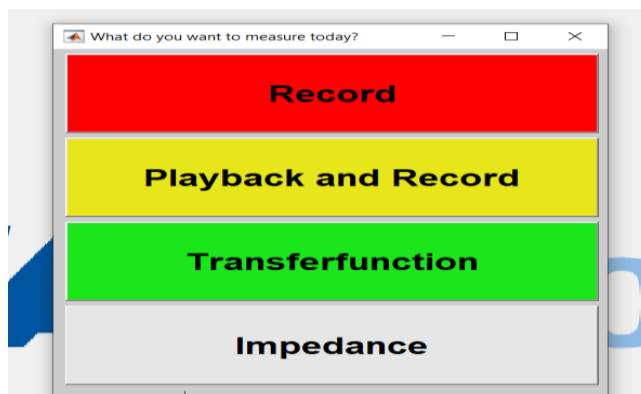


Figura 44 - Medições realizadas pelo Ita-Toolbox

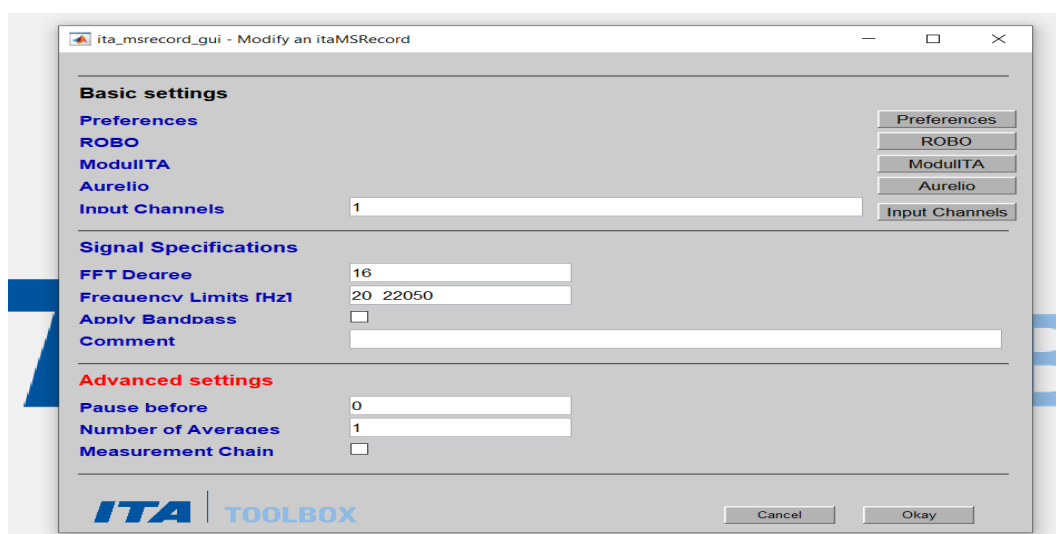


Figura 45 - Configurações iniciais para iniciar as medições

4. RESULTADOS

Para o primeiro teste foi utilizado o microfone de eletreto construído. Selecionando a opção impedância referente a Figura 44 e empregando a configuração da Figura 46 onde na opção “*signal type*” é possível definir a utilização o som utilizado.

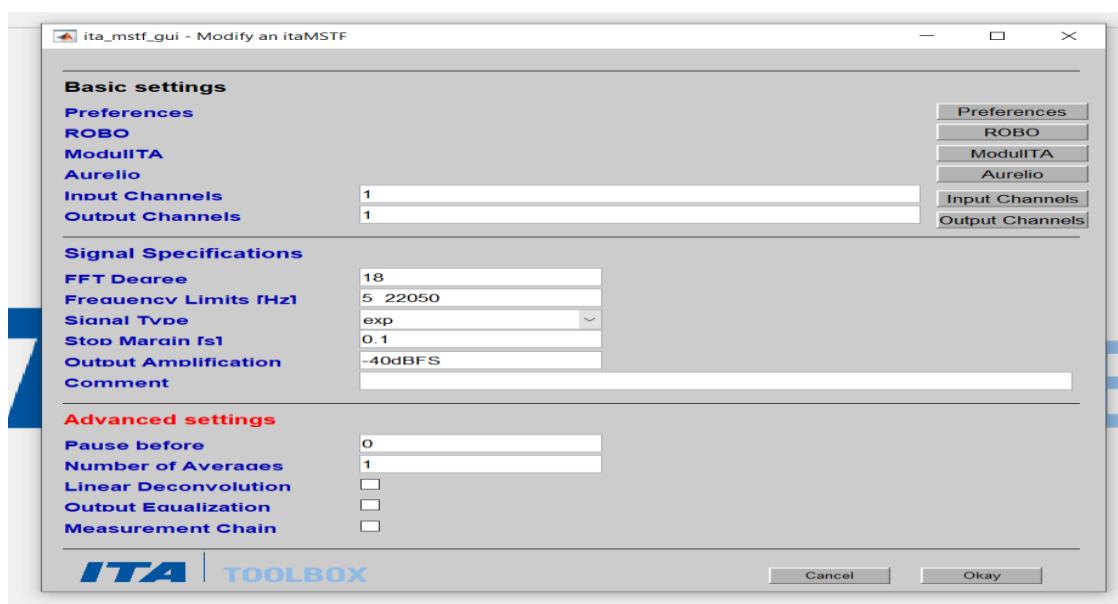


Figura 46 - Configurações da primeira medição

Onde o gráfico fornecido foi do primeiro teste é o representado na Figura 47.

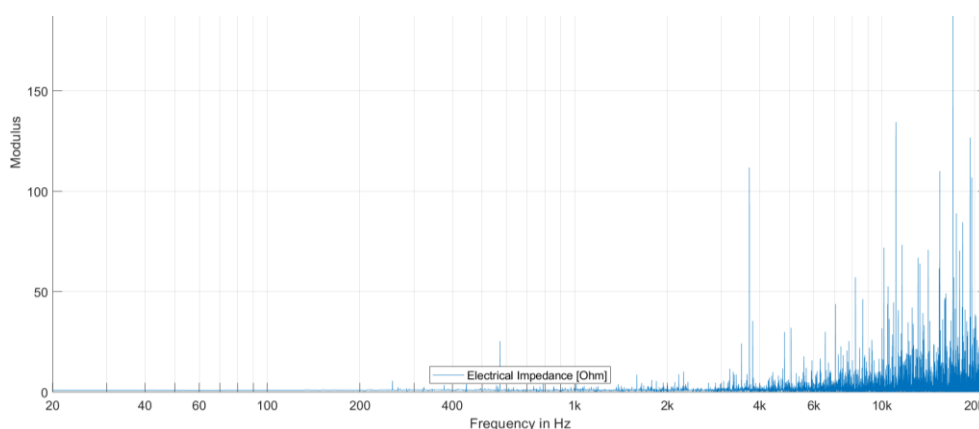


Figura 47 - Resultado da primeira medição

Os testes posteriores foram feitos utilizando o microfone adquirido em parceria com o IFG - Campus Goiânia com a configuração referente a Figura 48. A primeira medição alusiva a Figura 49 foi feita com o tubo de impedância vazio com o cap de PVC, a segunda medição referente a Figura 50 foi feita com a amostra posicionada dentro do tubo, a terceira medição indicativa a Figura 51 foi feita aumentando a opção “output amplification” para 0.

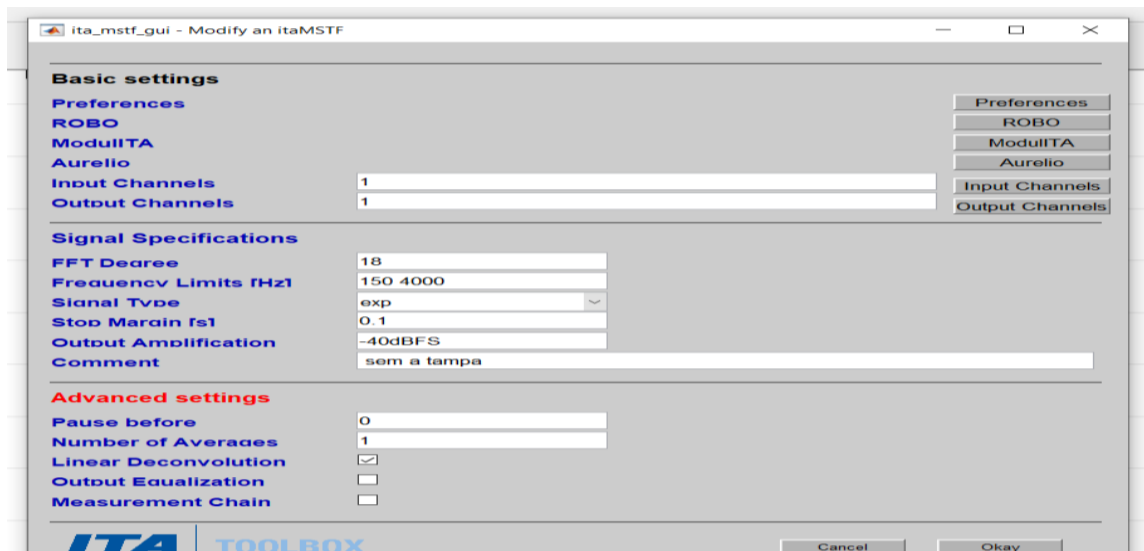


Figura 48 - Configuração para as posteriores medições

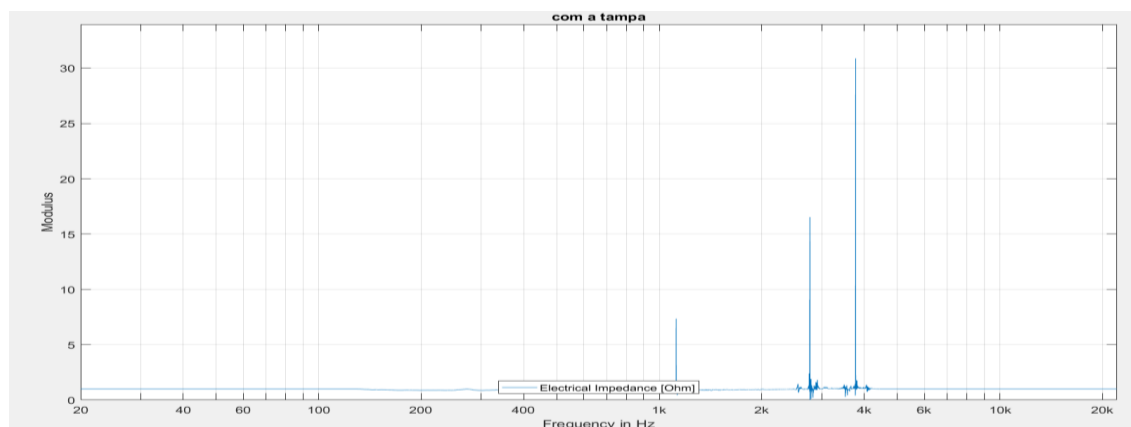


Figura 49 - Medição realizada com o cap de PV

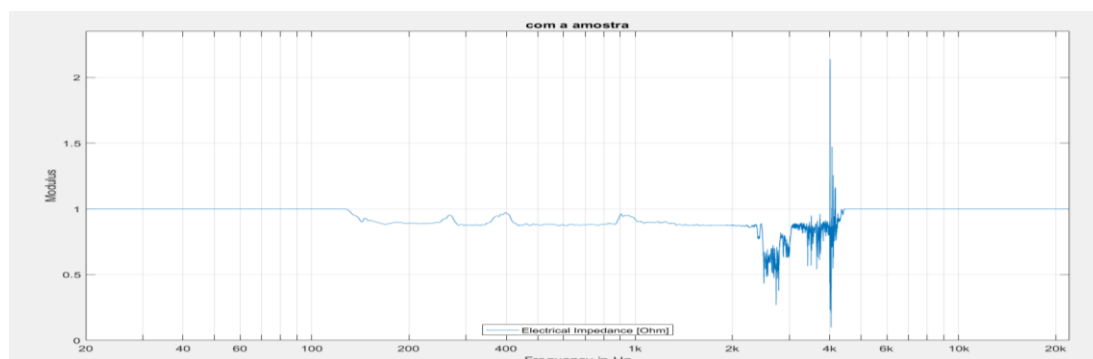


Figura 50 - Medição realizada com a amostra dentro do tubo.

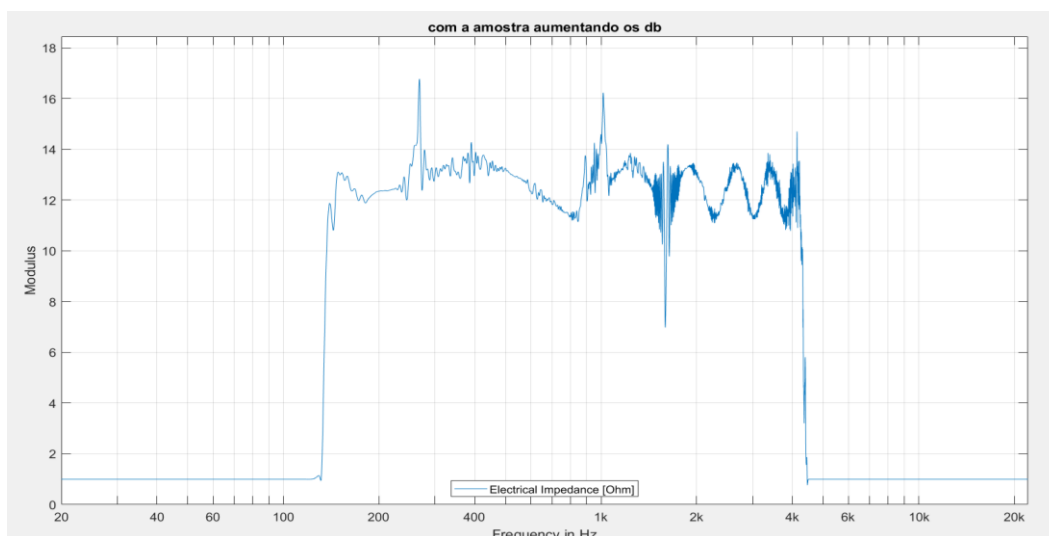


Figura 51 - Medição realizada aumentando a intensidade sonora

Depois de realizada as medições, foi constatado que a grandeza física calculada não estava sendo o coeficiente de absorção do material, pois o gráfico estava variando de acordo com a intensidade sonora.

Então foi feita uma busca nos arquivos do programa, procurando como seria realizado a medição do coeficiente de absorção e foi encontrado os tipos de tubos de impedância que o programa calcula, mostrado na Figura 52:

```

C:\Program Files\Polyspace\R2020a\bin\toolbox-master\toolbox-master\applications\Measurement\ImpedanceTube\ita_kundt_calc_impedance.m
ibox_setup.m x ita_gui_menueentries_kundt.m x ita_kundt_calc_impedance.m x ita_kundt_setup.m x +

%
%
% Default Dimensions of the Kundt's Tubes at ITA
%
% Small Tube
% Rohrdurchmesser: 50.8 mm
%
%
%
% source          mic3    mic2 mic1          probenhalter          mic4 mic5    mic6          termination
% |-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|
%
% <-----> <-----> <-> <-----> <-----> <-----> <-> <-----> <----->
%      200mm      93mm  17mm  100mm      50mm      100mm      17mm  93mm      200mm
%                  d13-d12 d12    s_v          s_h      d45  d46-d45
%
% Big Tube
% Querschnitt: 15 x 15 cm^2
%
% source          mic3 mic2    mic1          mat_probe
% |-----|-----|---|-----|
%
% <-----> <-> <-----> <----->
%      66.5cm      5cm  8cm      20.5cm      (d45,d46,s_h = 0 !!!)
%
% <ITA-Toolbox>
% This file is part of the application Kundt for the ITA-Toolbox. All rights reserved.
% You can find the license for this m-file in the application folder.
% </ITA-Toolbox>
%
% Author: Martin Pollow, mpo@akustik.rwth-aachen.de, 12.11.09
%
% ToDo: Transmission calculation

```

Figura 52 - Tipos de tubos utilizados pelo Ita-Toolbox

Ademais, para se determinar o coeficiente de absorção pelo ita-toolbox seria necessário a utilização de três microfones para o experimento, o que se tornou inviável para o prosseguimento do experimento pois não possuía 3 microfones necessários para realizar as medidas.

Para futuras medições do coeficiente de absorção pelo ITA-Toolbox se deve seguir o exemplo da Figura 52 selecionando a opção “*applications*”, escolher o “*kundt's Tube*” selecionar a quantidade de microfones que utilizaram como na Figura 53 e, posteriormente, qual foi o tipo de tubo utilizado como mostrado na Figura 55.

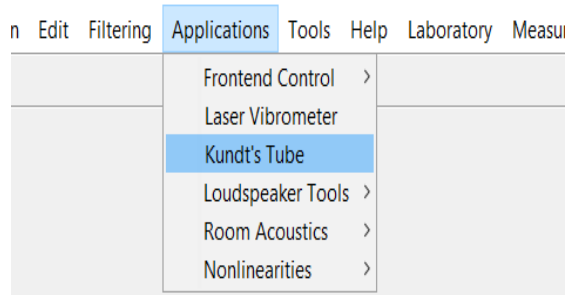


Figura 53 – Applications

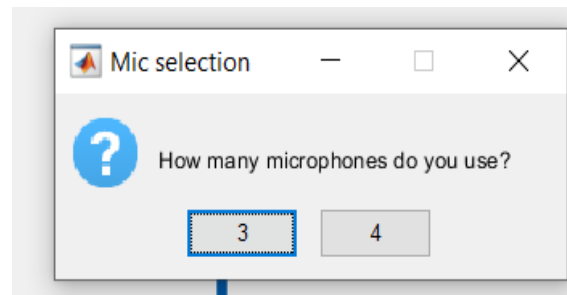


Figura 54 - Quantidade de microfones

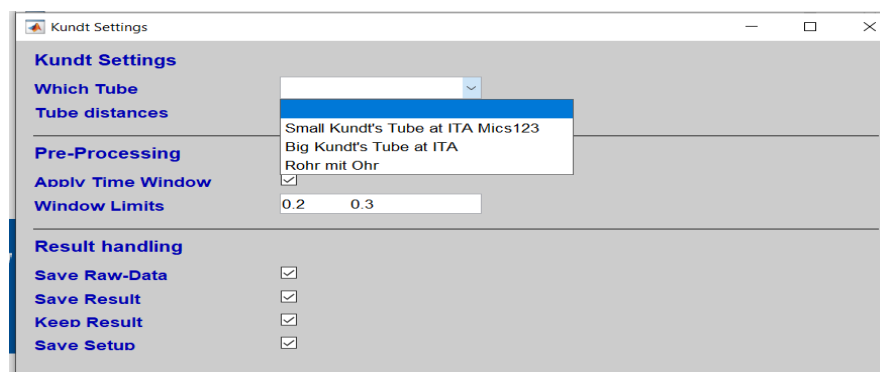


Figura 55 - Tipos de tubos utilizados

5. CONCLUSÃO

Relembrando os objetivos do trabalho.

- Dimensionar e fabricar um tubo de impedância com materiais acessíveis e de baixo custo.

Esta primeira parte foi cumprida todas as exigências que normas e os referenciais teórico exigiam, o que se mostrou uma tarefa possível de ser realizada.

- Realizar medições da impedância de materiais padronizados para determinar o grau de precisão do aparato construído.

Na segunda parte do trabalho não foi possível determinar o grau de precisão do aparato construído. A partir dos resultados obtidos pode-se considerar algumas ressalvas necessárias sobre o desenvolvimento do tubo, tais como:

- Especificidade do programa escolhido, por apresentar apenas a opção de medições com 3 a 4 microfones, enquanto o disponível para utilização no trabalho era de 2 microfones.
- A partir de informações colhidas pelo professor parceiro em Goiânia, que possuía contato com autores de trabalho parecido, foi informado que desenvolveram o próprio programa para as medições. O programa foi disponibilizado, porém era necessária outra interface de áudio a qual, o presente trabalho não possuía acesso.

Para aumentar a confiabilidade e precisão das medições, algumas melhorias incluem a introdução de um dispositivo de posicionamento de amostra e microfones, que facilita a colocação das amostras e aumenta a precisão das distâncias entre as amostras e os microfones. Afetando os resultados porque pode ser identificado na equação do software ITA-Toolbox.

O projeto do tubo além de permitir uma oportunidade de se obter um aparelho para medir o coeficiente de absorção, também nos deu embasamento para discutir as teóricas e princípios acústicos e críticas ao próprio método de medição. Ele enfatizou os pontos fortes e as limitações do método.

6. REFERÊNCIAS

BISTAFA, Sylvio Reynaldo. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 3 ed. São Paulo: Blucher. 2018.

BRÜEL & KJAER. **Ficha técnica dos tubos de impedância**. 2019. Disponível em: <<https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/acoustic-material-testing-kits/transmission-loss-and-impedance-tube-kits-4206>> Acesso em: 15 mai. 2022.

BUSULO, Welington Fagundes. **Construção de um tubo de impedâncias e teste através do método de função de transferência**. 2017. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10553/1/CT_DAMEC_2017_2_34.pdf> Acesso em: 07 abr. 2022.

Conheça nossa linha de Alto-falantes. **Champion alto-falantes**. 2021. Disponível em: <<https://championaltofalantes.com.br/alto-falantes>> Acesso em: 03 abr. 2022.

COSTA, Cruz Enio. **Acústica técnica**. 1 ed. v. 1 n. 1 São Paulo: Blucher. 2003.

Gerges, Samir Nagi Yousri. **Ruído – Fundamentos e Controle**. 2000.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física**. 8 ed. v.2. 2009.

ISO 10534-2. **Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes**.1998.

ITA-TOOLBOX. **A MATLAB Toolbox for Acoustics**. 2010. Disponível em: <www.ita-toolbox.org/index.php> Acesso em: 07 abr 2022.

KUTTRUFF, Heinrich. **Acoustics an introduction**. 1 ed. Germain: TAYLOR & FRANCIS. 2006.

LABASOVA, Eva; DURIS, Rastislav. Measurement of the Acoustic Absorption Coefficient by Impedance Tube. **Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology**. 2019. v. 27. n. 45 p. 94–101. 2019. <<https://doi.org/10.2478/rput-2019-0031>> Acesso em: 07 abr 2022.

LARCHER, José Henrique Kleinübing; WACHHOLZ, Matheus Henrique. **Construção e teste de um tubo de impedância para medição de isolamento**. 2018. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10415/1/CT_DAMEC_2018_2_12.pdf> Acesso em: 20 mar. 2022.

MELO, Nôe. Geraldo. R. de Filho., *et al.* **Construção de tubo de impedância educacional TIGaD (tubo de impedância do gama demonstrativo) – estudo numérico e experimental do comportamento vibroacústico de um tubo de impedância.** 2010. Disponível em:

<<https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1865.pdf>> Acesso em: 20 mar. 2022.

NEGRI, Cassiano Vargas. **Desenvolvimento de uma caixa de acústica BandPass de 4ª ordem.** 2008. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Área de Concentração e Vibração Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/91886>> Acesso em: 10 mar. 2022.

NUSSENZVEIG, Herch. Moysés. **Curso de Física Básica.** 4 ed. v. 2. São Paulo: Blucher. 1998.

PAVAN, Bruno Barcellos. **Análise da absorção acústica da fibra de coco em comparação com espuma acústica comercial via tubo de impedância.**

2017. 23 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em:

<<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/172322/001058908.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 07 fev. 2022.

PÚBLIO, Allan Rosa. **Comparação entre o método do tubo de impedância e o método *IN SITU* sem a utilização da fonte sonora para a medição do coeficiente de absorção sonora.** 2020. 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em:

<<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/29165/1/ComparaçãoMétodoTubo.pdf>> Acesso em: 12 jan. 2022.

SALVO, Ricardo. Vasconcelos., *et al.* **Construção de um tubo de impedância.** 2015. 8f. 15º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2020. Disponível em:

<<https://docplayer.com.br/23556206-Construcao-de-um-tubo-de-impedancia.html>> Acesso em: 20 jan. 2022.

SMALL, Richard. H **Closed Box Loudspeaker Systems Part II Synthesis.** School of Electrical Engineering, The University of Sydney. Sydney, Australia. 1972 Disponível em: <<http://diyaudioprojects.com/Technical/Papers/Closed-Box-Loudspeaker-Systems-Part-II-Synthesis.pdf>> Acesso em: 02 jun. 2022.

SOUSA, Lucas Vieira Dias; LIMA, Pedro Henrique Ramos de. **Avaliação de microfones de baixo custo em projeto de controle ativo de ruído em dutos.** 2015. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Física e Tecnologia do Goiás, Goiânia, 2015. Disponível

em:

<[http://w2.ifg.edu.br/goiania/mecanica/images/Arquivos/TCC_MECANICA/ata2015-](http://w2.ifg.edu.br/goiania/mecanica/images/Arquivos/TCC_MECANICA/ata2015-03em_autor_lucas_e_pedro_avaliacao_micofones_em_contole_ativo_ruidos_dutos.pdf)

[03em_autor_lucas_e_pedro_avaliacao_micofones_em_contole_ativo_ruidos_dutos.pdf](http://w2.ifg.edu.br/goiania/mecanica/images/Arquivos/TCC_MECANICA/ata2015-03em_autor_lucas_e_pedro_avaliacao_micofones_em_contole_ativo_ruidos_dutos.pdf)> Acesso em: 18 mar. 2022.