

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação

PEDRO HENRIQUE DO AMARAL COELHO BARBOSA

**ANÁLISE DO PROJETO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA DO LABORATÓRIO DE
MECÂNICA APLICADA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS BASEADO NA
NORMA ISO 10534-2**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): PEDRO HENRIQUE DO AMARAL COELHO BARBOSA

Título do trabalho: ANÁLISE DO PROJETO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA DO LABORATÓRIO DE MECÂNICA APLICADA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS BASEADO NA NORMA ISO 10534-2

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [] NÃO*

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(a)(s) autor(a)(es)(as) e ao(a) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Marilpe Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 16/08/2023, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Henrique Do Amaral Coelho Barbosa, Usuário Externo**, em 16/08/2023, às 10:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3966106** e o código CRC **3751A129**.

PEDRO HENRIQUE DO AMARAL COELHO BARBOSA

**ANÁLISE DO PROJETO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA DO LABORATÓRIO DE
MECÂNICA APLICADA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS BASEADO NA
NORMA ISO 10534-2**

Projeto Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação.

Orientador: Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

GOIÂNIA

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Barbosa, Pedro Henrique do Amaral Coelho
ANÁLISE DO PROJETO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA DO
LABORATÓRIO DE MECÂNICA APLICADA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE GOIÁS BASEADO NA NORMA ISO 10534-2
[manuscrito] / Pedro Henrique do Amaral Coelho Barbosa. - 2023.
LVIII, 58 f.

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.

Inclui gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Acústica. 2. Tubo de impedância. 3. Coeficiente de absorção
sonora. 4. ISO 10534-2. 5. Espuma acústica. I. Fagundes Neto,
Marlipe Garcia, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Curso

() Eng Elétrica	(X) Eng Mecânica	() Eng Computação PFC 1 () PFC 2 ()
------------------	--------------------	-------------------------------------------

Título do Trabalho

ANÁLISE DO PROJETO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA DO LABORATÓRIO DE MECÂNICA APLICADA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS BASEADO NA NORMA ISO 10534-2

Banca Avaliadora

Membro 1	Marlize Garcia Fagundes Neto
Membro 2	Sigeo Kitatani Júnior
Membro 3	Pedro Pio Rosa Nishida

Discente

Matrícula	Nome
201800272	Pedro Henrique do Amaral Coelho Barbosa

NOTAS

Matrícula	Membro 1			Membro 2			Membro 3			Média*
	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	
	10,0	8,0	8,0	10,0	9,0	8,5	10,0	8,5	9,0	8,65

NPT – Nota plano de trabalho;

NTE – Nota do trabalho escrito;

NAA – Nota de apresentação e arguição

Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação: $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$

Para PFC1 da Eng. Da Computação: $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

* A APROVAÇÃO DO(S) ALUNO(S) ESTÁ CONDICIONADA À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO FINAL AO ORIENTADOR COM TODAS AS CORREÇÕES SUGERIDAS PELA BANCA.

OBSERVAÇÕES:

Preencher com modificações solicitadas, caso existam. Em caso de reprovação, informar a justificativa.

Atender as solicitações da banca na correção. _____



Documento assinado eletronicamente por **Marlipe Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 15/02/2023, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Pio Rosa Nishida, Usuário Externo**, em 15/02/2023, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sigeo Kitatani Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 15/02/2023, às 16:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3532613** e o código CRC **64958831**.

PEDRO HENRIQUE DO AMARAL COELHO BARBOSA

**ANÁLISE DO PROJETO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA DO LABORATÓRIO DE
MECÂNICA APLICADA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS BASEADO NA
NORMA ISO 10534-2**

Projeto Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação.

Orientador: Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

Goiânia, 18 de fevereiro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto
Orientador – Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior
Convidado 1 – Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Pedro Pio Rosa Nishida
Orientador – Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, que me guiou nessa jornada. Sem Ele não chegaria em lugar nenhum.

Agradeço aos meus pais e meus avós, que são a estrutura sólida que me apoia e me dá forças.

Agradeço à minha namorada, Yumi, que esteve do meu lado em todos os momentos, bons ou ruins, sempre motivando e me ajudando.

Agradeço aos meus grandes amigos que carrego desde a infância, e àqueles que pude fazer através da Universidade Federal de Goiás.

Agradeço aos meus caros colegas de trabalho, em especial aos grandes mestres Jailson e Eber pelos ensinamentos.

Agradeço à Universidade e todos seus docentes, por proporcionar um aprendizado engrandecedor.

E agradeço ao meu orientador Marlipe pelas brilhantes aulas ministradas durante o curso e o auxílio neste PFC.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é analisar o aparato experimental do tubo de impedância do Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), cuja rotina experimental é enunciada pela norma ISO 10534-2/1998. Posteriormente, identificar problemas em potencial causados por itens em desacordo entre a ISO e a construção do protótipo. Após identificá-los, foi feita uma proposta de intervenção com a fabricação de novas peças, e com isso foram feitas uma série de medições dos coeficientes de absorção sonora de duas amostras de espumas acústicas, envolvendo a configuração original do tubo de impedância, bem como duas configurações novas de proposta de intervenção. Com os dados em mãos, foram comparados em combinações de 2 a fim de isolar as variáveis e observar isoladamente o efeito dos itens em desacordo com o enunciado normativo. Foi possível observar a mudança do comportamento dos resultados isoladamente, e depois como um todo.

Palavras-chave: Acústica; Tubo de impedância; Coeficiente de absorção sonora; Adequação normativa; Norma ISO 10534-2; Espuma acústica.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the experimental apparatus of the impedance tube of Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC), of Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) of Universidade Federal de Goiás (UFG), which experimental routine is stated by the norm ISO 10534-2/1998, and with that identify potential problems caused by non-compliant items between ISO and prototype construction. After identifying them, an intervention proposal was made with the manufacture of new parts, and with that a series of measurements were made involving two samples of acoustic foams, involving the original configuration of the impedance tube, as well as two new intervention proposal configurations. With the data in hand, they were compared in combinations of 2 in order to isolate the variables and observe separately the effect of the items in disagreement with the standard. It was possible to observe the change in the behavior of the results separately, and then as a whole.

Keywords: Acoustics; Impedance tube; Sound absorption coefficient; Normative adequation; ISO 10534-2; Acoustic foam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Linha do tempo dos trabalhos.....	11
Figura 1.2 - Microfones desalinhados devido a folga nos furos	14
Figura 1.3 - Tubos desalinhados devido a folga nas conexões	15
Figura 1.4 - Tubo de impedância comercial	15
Figura 2.1 - Comportamento do som mediante obstáculo	19
Figura 2.2 - Tubo de impedância	20
Figura 3.1 - Fluxograma do plano de ação	24
Figura 3.2 – Perspectiva isométrica da bucha para microfone de ¼”	25
Figura 3.3 - Montagem da bucha com o microfone de ¼”	25
Figura 3.4 – Perspectiva isométrica da bucha para microfone de ½”	26
Figura 3.5 - Montagem da bucha com o microfone de ½”	26
Figura 3.6 - Curva de poder dos tamanhos amostrais	27
Figura 3.7 - Régua fixadora de madeira.....	29
Figura 3.8 - Amostra 1 (esquerda) e amostra 2 (direita)	29
Figura 3.9 - <i>Layout</i> da ISO do equipamento de testes.....	30
Figura 3.10 - Aparato experimental: Alto-falante, tubo e microfones	31
Figura 3.11 - Gerador de ruído e amplificador (esquerda) e placa de aquisição de dados (direita).....	31
Figura 3.12 - Interface do código no MatLAB de aquisição de dados	32
Figura 3.13 - Interface guiada para configuração de aquisição de dados.....	33
Figura 3.14 - Buchas de poliacetal para microfone de ¼”	34
Figura 3.15 - Buchas de poliacetal para microfone de ½”	34
Figura 3.16 - Buchas para ¼” montadas no tubo de impedância.....	35
Figura 3.17 - Buchas para ½” montadas no tubo de impedância.....	35
Figura 3.18 - Aparato experimental completo atualizado	36
Figura 4.1 - Cenário 1, material 1, faixa de frequências.....	38
Figura 4.2 - Cenário 1, material 1, bandas de oitava	39
Figura 4.3 - Cenário 1, material 2, faixa de frequências.....	39
Figura 4.4 - Cenário 1, material 2, bandas de oitava	40
Figura 4.5 - Cenário 2, material 1, faixa de frequências.....	41
Figura 4.6 - Cenário 2, material 1, bandas de oitava	42
Figura 4.7 - Cenário 2, material 2, faixa de frequências.....	42
Figura 4.8 - Cenário 2, material 2, bandas de oitava	43
Figura 4.9 - Cenário 3, material 1, faixa de frequências.....	44

Figura 4.10 - Cenário 3, material 1, bandas de oitava	45
Figura 4.11 - Cenário 3, material 2, faixa de frequências.....	45
Figura 4.12 - Cenário 3, material 2, bandas de oitava	46
Figura 4.13 - Resultados gerais, material 1, faixa de frequências	47
Figura 4.14 - Resultados gerais, material 1, bandas de oitava	48
Figura 4.15 - Resultados gerais, material 2, faixa de frequências	48
Figura 4.16 - Resultados gerais, material 2, bandas de oitava	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Seleção do tamanho amostral.....	27
Tabela 4.1 - Resultados do cenário 1.....	40
Tabela 4.2 - Resultados do cenário 2.....	43
Tabela 4.3 - Resultados do cenário 3.....	46
Tabela 4.4 - Resultados gerais, material 1.....	49
Tabela 4.5 - Resultados gerais, material 2.....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
	1.1 OBJETIVOS.....	16
	1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3	METODOLOGIA.....	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
	4.1 CENÁRIO 1: CONFIGURAÇÃO 1 VS CONFIGURAÇÃO 2	38
	4.2 CENÁRIO 2: CONFIGURAÇÃO 2 VS CONFIGURAÇÃO 3	41
	4.3 CENÁRIO 3: CONFIGURAÇÃO 1 VS CONFIGURAÇÃO 3	44
	4.4 VISÃO GERAL DOS RESULTADOS.....	47
5	CONCLUSÃO.....	51
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
7	APÊNDICE A.....	55
8	APÊNDICE B.....	56
9	APÊNDICE C.....	57

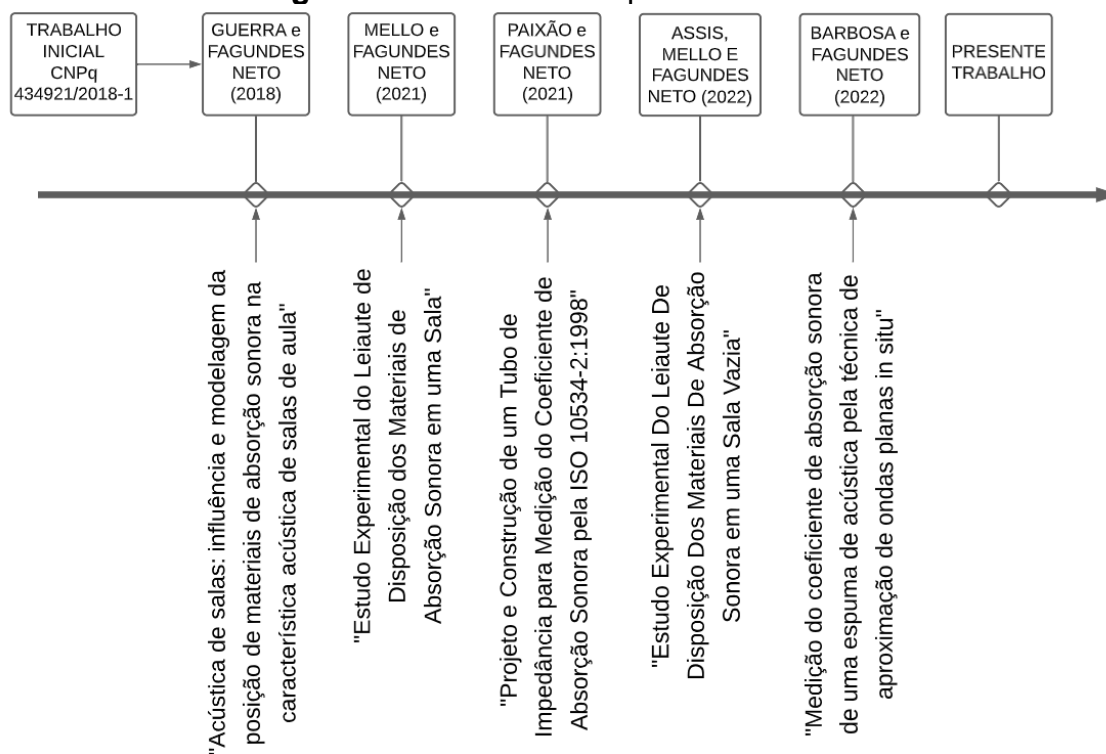
1 INTRODUÇÃO

A acústica é um ramo de estudo de suma importância, visto que a expansão da urbanização e a conglomeração cada vez mais densa de centros urbanos leva à problemas com ruídos, gerados pela proximidade com grandes avenidas, centros industriais, metrô, linhas de trem, aeroportos, indústrias etc. Ainda é possível destacar a importância do controle de ruído e dose sonora para as quais os moradores de um centro urbano ou funcionários de um ambiente de trabalho com um elevado nível sonoro mantêm-se expostos durante o dia. BISTAFA (2011) define o controle de ruído como uma tecnologia multidisciplinar com objetivo de chegar a um nível de ruído aceitável em certo ambiente, que seja consistente com aspectos econômicos, operacionais, legais, médicos, psicológicos e culturais.

Sendo assim, o estudo da acústica vem se refinando e modernizando com novos materiais e ferramentas de simulação computacional e de aferição de características de materiais e meios. E munidos desse conhecimento torna-se possível elaborar projetos com uma gama de materiais em conjunto buscando atingir algum fim para determinado ambiente, manipulando níveis de reverberação, absorção, direcionamento do som ou até sua amplificação, em casos específicos.

A caracterização de meio e materiais de absorção sonora é uma linha de pesquisa ativa na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), sendo objeto de estudo em outras oportunidades, e os trabalhos desenvolvidos estão dispostos na linha do tempo na **Figura 1.1** abaixo.

Figura 1.1 - Linha do tempo dos trabalhos



Fonte: Autor, 2023

Dessa linha de pesquisa, o pioneiro dos trabalhos foi o projeto CNPq 434921/2018-1 "Acústica de Salas: Influência e modelagem da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula". GUERRA e FAGUNDES NETO (2018) desenvolveram um trabalho voltado para a obtenção de dados de coeficiente de absorção sonora de uma amostra de espuma de tratamento acústico, e para isso utilizaram dois métodos de amostragem. O primeiro foi o método *in situ*, e o segundo o tubo de impedância. O último, objeto de estudo deste presente trabalho.

Sucedendo esse, o projeto do tubo de impedância utilizado no trabalho anterior foi sujeito a modificações propostas no trabalho de PAIXÃO e FAGUNDES NETO (2021), visando adequá-lo à norma ISO 10534-2:1998, a fim de aumentar a confiabilidade dos dados adquiridos por esse aparato experimental.

Seguindo em linha paralela ao desenvolvimento do tubo de impedância, MELLO e FAGUNDES NETO (2020) desenvolveram um trabalho voltado ao campo sonoro em ambiente fechado por meio de parâmetros acústicos obtidos

experimentalmente em salas fechadas, a fim de comparar tais números com equacionamentos provenientes da acústica estatística.

Ainda nessa linha, MELLO e FAGUNDES NETO (2022) continuaram aprofundando a experimentação, analisando em específico a influência de diferentes configurações de disposição espacial de materiais acústicos dispostos em uma sala fechada.

E por fim, BARBOSA e FAGUNDES NETO (2022) desenvolveram um trabalho a fim de aprofundar os estudos nos métodos inicialmente propostos, dando a eles uma continuidade e aprimoramento, e realizando uma análise comparativa entre os 3 métodos.

Observando a linha do tempo, então, é notório existem algumas opções disponíveis de métodos de medição dessas características acústicas que se deseja conhecer e estudar, cada qual com suas vantagens e desvantagens, e aplicações específicas dependendo da finalidade: sala reverberante, medição *in situ* e tubo de impedância.

O tubo de impedância, então, é um instrumento com o qual é possível realizar um ensaio destrutivo com uma amostra de material. Nesse ensaio, é possível conhecer o coeficiente de absorção sonora e características de impedância sonora ao longo de um leque de frequências de onda, informações importantes para o conhecimento e modelagem do comportamento das ondas sonoras quando se deparam com um obstáculo composto daquele material.

Quando comparado entre os outros métodos de medição supracitadas, é válido destacar como vantagens técnicas do tubo de impedância seu baixo custo de aquisição ou construção, custo operacional também baixo, simplicidade das peças e da montagem do aparato como um todo, e agilidade dos preparativos e procedimentos, bem como a necessidade de poucos equipamentos (GERGES, 2000). Suas desvantagens, porém, envolvem o fato de não ser possível realizar uma medição que leve em conta toda a composição de materiais e formas geométricas que compõem um ambiente a ser analisado, e também por ser um ensaio destrutivo, no qual é necessário remover uma amostra do material a ser analisado.

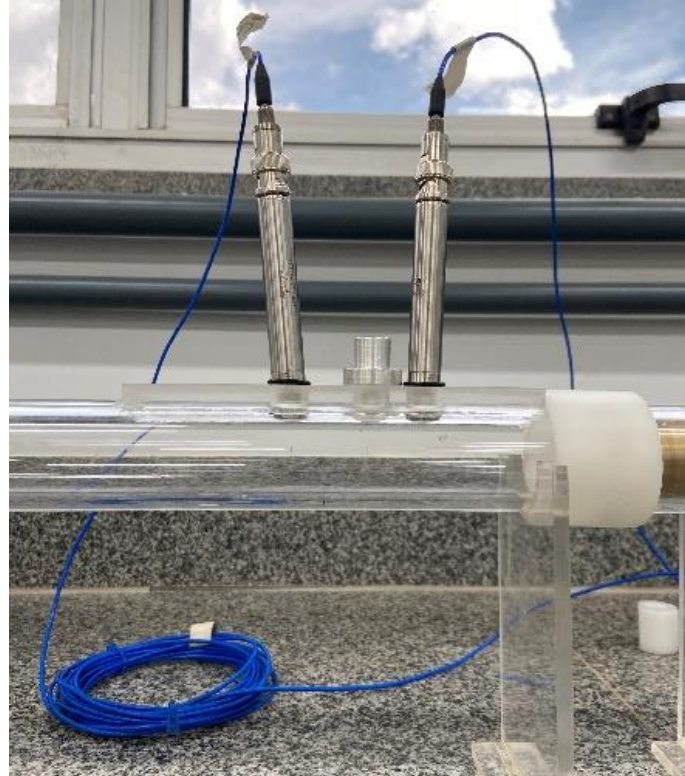
Posto isso, o procedimento experimental padrão que deve ser seguido quando realizado algum experimento utilizando um tubo de impedância é descrito pela norma ISO 10534-2/1998 – Acústica: Determinação do coeficiente

de absorção sonora e impedância em tubos de impedância. Na norma é possível encontrar enunciados para a realização do experimento, como equações para dimensionamento correto das peças; cálculos relativos à faixa de frequência utilizável; boas práticas de medição; como tratar os dados; e de forma geral como conduzir o experimento de maneira mais acurada possível.

Dentro disso, então, alguns desses pontos de desacordo devem ser apontados. Na seção 4.4 da ISO, dos microfones, é enunciado que o diâmetro dos microfones seja inferior a 20% do espaçamento entre eles. Tendo isso em vista, sabe-se que o projeto conta com duas opções de espaçamento (s) entre os microfones. No maior deles, a distância de centro a centro dos furos é de 50mm, e no tubo de impedância original, microfones de meia polegada (aproximadamente 12,7mm) foram utilizados, os quais ultrapassam os 20% de 50mm (10mm).

Na seção 4.5 da norma, da posição dos microfones, é dito que cada microfone deve ser posicionado com seu diafragma rente à face interna do tubo. Ainda, o microfone deve ser selado no furo de posicionamento com algum tipo de vedação, como um o-ring. Porém, devido à maneira que foi projetado o suporte que faz a interface entre os microfones e o tubo, o peso do fio que comunica os microfones com a placa de controle os faz perder o posicionamento, desviando-os de estarem faceados internamente com o tubo à 90°. Além disso, devido à mesma causa, a vedação com o o-ring dos microfones é comprometida. MATHEUS BARBOSA (2022) cita que no protótipo inicial era necessário um cuidado maior no encaixe das peças devido ao fato de ter uma folga suficiente para não manter firmeza o bastante, como observável na **Figura 1.2**.

Figura 1.2 - Microfones desalinhados devido a folga nos furos



Fonte: Autor, 2023

Outro ponto no qual a vedação está comprometida quando comparada com a situação ideal enunciada pela norma é que nela é sugerido que a vedação entre partes móveis de um tubo que não é inteiriço seja reforçada com vaselina, como citado na seção 4.7, do suporte de amostra de teste, e na seção 6, do posicionamento da amostra de teste.

Colaborando com o ponto anterior, os suportes que apoiam o tubo, e as tolerâncias entre suas partes, não garantem que as seções estão encaixadas coaxialmente entre si, vide **Figura 1.3**. Isso pode afetar a medição devido à má vedação, uma vez que se trata de um experimento no qual são esperadas ondas planas.

Figura 1.3 - Tubos desalinhados devido a folga nas conexões



Fonte: Autor, 2023.

Observando uma das soluções comercializadas por *KUNDT TF ACOUSTICS ACUPRO*, **Figura 1.4**, é possível observar uma composição diferente do tubo. Nessa proposta comercial, na qual as partes móveis são fixadas entre si com flanges parafusadas, é garantida uma rigidez maior à estrutura e evita-se desalinhamentos entre as partes e perda de vedação, que consequentemente resulta numa perda de pressão.

Figura 1.4 - Tubo de impedância comercial



Fonte: *KUNDT TF ACOUSTICS ACUPRO*, 2023

1.1 OBJETIVOS

Então, dos objetivos do presente trabalho:

- Objetivo principal:
 - Analisar o protótipo do tubo de impedância do Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

- Objetivos específicos:
 - Estudo e análise da norma ISO 10534-2/1998;
 - Determinação dos itens divergentes entre a norma e o protótipo inicial que possam estar influenciando os resultados das medições;
 - Realização de medições iniciais para determinar um ponto de partida;
 - Revisão do projeto, e reprojeção das peças propostas;
 - Construção das peças propostas;
 - Realização de novos testes para mensurar a possível influência destes itens em desacordo.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Nos próximos capítulos desse trabalho, então, será apresentada a base teórica sobre a qual é desenvolvido a análise do tubo de impedância. Será exposto também os conceitos envolvendo o estudo da acústica, e em maior especificidade os conceitos que envolvem a aferição do coeficiente de absorção sonora de amostras de materiais acústicos pelo método da ISO, como o conceito de onda plana, impedância sonora e coeficiente de absorção sonora.

Posteriormente, será abordada a construção do tubo, apresentando quais limites envolvem o dimensionamento deste e quais implicações experimentais as escolhas dimensionais têm.

Em seguida, tendo em mãos essa informação, é possível observar na norma os limites dimensionais sugeridos, e com isso confrontar com os parâmetros do protótipo e pontuar quais pontos estão em desacordo.

Consequente, será estudada uma proposta de solução que aproxime o tubo de impedância do ideal enunciado na norma, com o reprojeto e substituição de algumas peças.

E por fim, alguns cenários de comparação serão levantados a fim de entender a influência que as mudanças propostas surtiram nos resultados obtidos com esse aparato experimental.

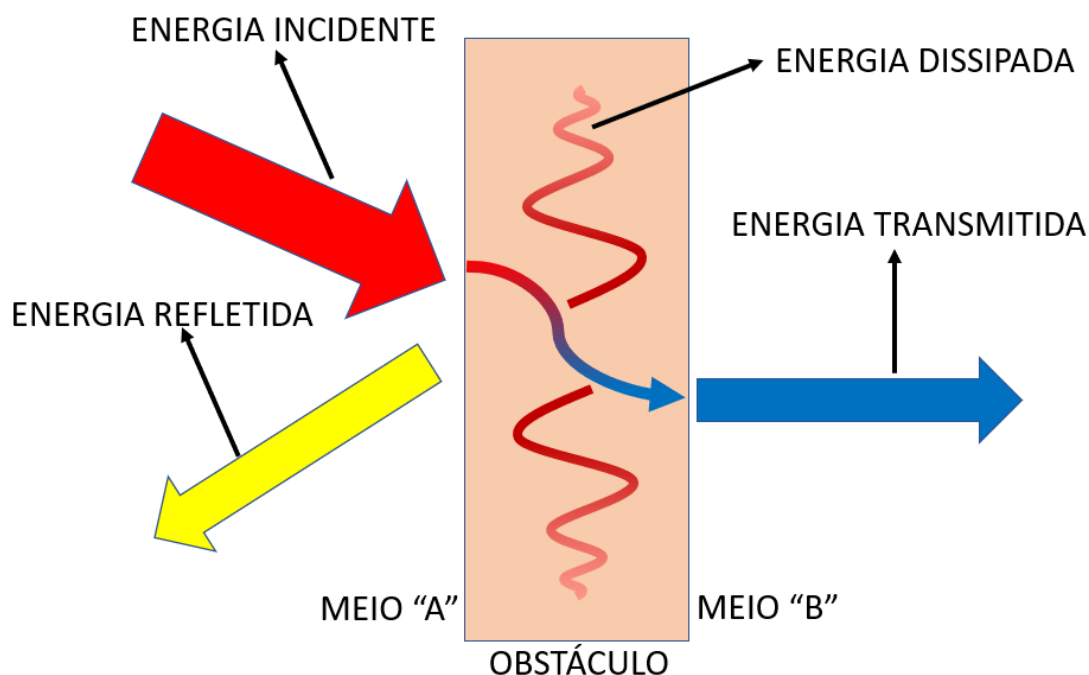
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O som consiste na propagação tridimensional de uma onda de natureza mecânica, composta de regiões de alta pressão e regiões de baixa pressão, alternadamente, e é de fato considerada “som” quando é detectável pelo sistema auditivo. Tal propagação ocorre de maneira uniforme quando em meio uniforme, e em todas as direções quando ininterrupto por obstáculos.

O tubo de impedância, em específico, é um aparato experimental no qual o funcionamento é baseado em manipular a propagação da onda sonora de maneira que seu comportamento seja plano e unidirecional. Ao se tratar de uma onda plana, o deslocamento das partículas que compõem o meio possui a mesma amplitude em todos os pontos de qualquer seção perpendicular à direção única na qual se desenvolve a propagação. BISTAFA (2011) cita que ondas sonoras planas ocorrem em situações muito particulares, como por exemplo o interior de um duto com diâmetro bem menor que o comprimento de onda. Esse é exatamente o caso sobre o qual o aparato experimental do tubo de impedância trabalha.

Ao percorrer um meio homogêneo, a onda tende a manter suas características ondulatórias, como comprimento de onda e amplitude, e duas situações podem dificultar este modelo simples: obstáculos na trajetória da propagação, ou a não uniformidade do meio (GERGES, 2000). Ao encontrar algum obstáculo acontecem basicamente 3 fenômenos, dentro dos quais a energia inicial transportada pela onda é dividida, e as características de cada onda sonora resultante são diferentes das iniciais. São eles a reflexão, a absorção e a transmissão, ilustrados na Figura 2.1.

A proporção de energia a ser dividida em cada uma dessas ondas resultantes é diretamente ligada às características originais do som antes de encontrar com o obstáculo, como sua amplitude e comprimento de onda, e também às propriedades inerentes do material que compõem o obstáculo.

Figura 2.1 - Comportamento do som mediante obstáculo

Fonte: Autor, 2023

E, por isso, a caracterização das propriedades de materiais e meios de propagação é muito importante pois determina diretamente o comportamento das ondas sonoras. Sendo assim, uma das principais propriedades para a engenharia de projetos de acústica é o coeficiente de absorção sonora.

O coeficiente de absorção sonora (α) ditará a proporção de energia envolvida no fenômeno da absorção. Em outras palavras é a quantidade relativa de energia dissipada pelo material em forma de vibração e atrito de suas moléculas (calor) que, por consequência, não fará parte das energias sonoras refletida e transmitida. O coeficiente varia de acordo com a frequência da onda sonora incidente, do nível de porosidade daquele material em questão, e de sua espessura, e pode ser definido pela Eq. (1).

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (1)$$

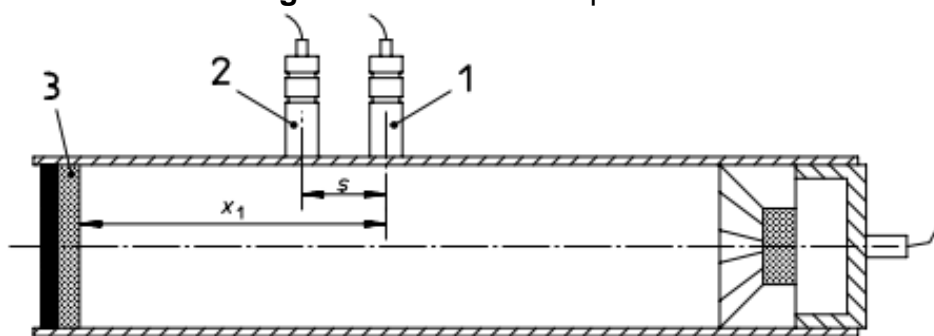
Na qual o coeficiente sonoro α é definido pelo quociente entre E_a , que corresponde à parcela de energia sonora incidente que será absorvida pelo material, e E_i , que corresponde à energia sonora incidente por completo, antes

da interação com o material. Por se tratar de uma relação entre a energia incidente e a absorvida, α varia entre 0 e 1.

Nesse método de medição, ondas planas são produzidas pelo alto-falante e incidem no meio confinado no interior do tubo (geradas por uma fonte de ruído branco e um amplificador), e os níveis de pressão sonora são captados por dois microfones de posição fixa, superficiais e normais ao tubo.

A configuração de um tubo de impedância é exemplificada na Figura 2.2, e ele é composto por: um tubo rígido e estanque, de dado diâmetro e comprimento; dois microfones na superfície interna do tubo (Números 1 e 2, na Figura 2.2), de diâmetro conhecido que ficarão dispostos com uma separação determinada e distância determinada até a terminação rígida do tubo; e no fim do tubo será posicionada a amostra do material (Número 3, na Figura 2.2) cujo coeficiente de absorção sonora será mensurado.

Figura 2.2 - Tubo de impedância



Fonte: ISO 10534-2:1998

Os parâmetros supracitados são calculados uma vez definida a faixa de frequências na qual a amostra de material será submetida o teste. Para tubos circulares como o do LabMEC, com diâmetro interno d , frequência de corte do experimento f_u , e velocidade do som no meio c_0 , as grandezas se relacionam como descrito na Eq. (2) (ISO 10534-2/1998).

$$f_u \cdot d < 0,58 \cdot c_0 \quad (2)$$

E na Eq. (3) (ISO 10534-2/1998), o espaçamento dos microfones (s) na superfície do tubo de impedância, em metros:

$$f_u \cdot s = 0,45 \cdot c_0 \quad (3)$$

Ainda, os microfones devem ser selecionados de forma que seu diâmetro seja pequeno em relação à c_0/f_u , e que não exceda 20% do espaçamento entre eles (s , da Eq. (3)).

Além disso, é recomendável que todos os encaixes entre seções do tubo estejam perfeitamente coaxiais entre si e sejam devidamente seladas, e a aplicação de gelatina de petróleo (vaselina) seja aplicada para garantir a vedação. A vedação no encaixe dos microfones também é necessária, e é feita com a utilização de o-rings.

Conhecendo o funcionamento do tubo de impedância e as equações que regem seus limites dimensionais, observa-se então os parâmetros de projeto definidos pelo projeto inicial do aparato experimental:

- Diâmetro interno (d) = 30mm;
- Espaçamento entre os microfones (s_1) = 20mm e (s_2) = 50mm;
- Comprimento do tubo = 200mm;
- Diâmetro de microfones disponíveis: 1/2" e 1/4".

Sabendo disso, então, utilizando a equação (2), $f_u < \frac{0,58 \cdot c_0}{d}$. Para um $c_0 = 341 \text{ m/s}$, e $d = 0,03\text{m}$, será $f_u < 6.592,67 \text{ Hz}$. Em outras palavras, essa a frequência máxima na qual o tubo deve operar dada sua geometria.

Utilizando a equação (3), na qual serão inseridas as duas distâncias de microfones disponíveis no tubo, para $s_1 = 20\text{mm}$, $f_u = \frac{0,45 \cdot c_0}{s} = 7.672,5\text{Hz}$, e para $s_2 = 50\text{mm}$, $f_u = \frac{0,45 \cdot c_0}{s} = 3.069 \text{ Hz}$. Visto que segundo a norma é recomendável que o diâmetro do microfone não seja maior que 20% que o espaçamento entre eles, como citado anteriormente, observa-se que 20% de s_1 é 4mm e 20% de s_2 é 10mm. Considerando que o microfone de 1/2" equivale a 12,7mm e o de 1/4" a 6,25mm, a configuração correta do aparato será utilizando o espaçamento de 50mm com o microfone de 1/4". Por isso, o $f_u = 3.069 \text{ Hz}$ é o adequado ao experimento.

Com isso, então, é possível seguir com o desenvolvimento algébrico. É possível calcular o coeficiente de absorção sonora e as impedâncias acústicas seguindo as equações de (4) a (10) (ISO 10534-2, 1998):

Na Equação (4), s_{12} é determinado pelo produto da pressão sonora complexa nas duas posições de microfones, obtidas pelos microfones através da placa de aquisição e auxílio da interface guiada do código no MatLAB. O * indica um complexo conjugado.

$$s_{12} = p_2 \cdot p_1^* \quad (4)$$

Na Equação (5), s_{11} é determinado pelo produto da pressão sonora complexa na posição 1 do microfone. Novamente, o * indica um complexo conjugado.

$$s_{11} = p_1 \cdot p_1^* \quad (5)$$

Na Equação (6), define-se a função de transferência H_{12} da posição 1 do microfone em relação a 2.

$$H_{12} = \frac{s_{12}}{s_{11}} \quad (6)$$

A Equação (7) é aquela que define o α , coeficiente de absorção sonora de incidência normal, o qual depende de r .

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

Pela Equação (8), define-se r , o fator de reflexão de incidência normal, que depende de k_0 , o número de onda, definido por $2\pi f/c_0$, na qual f é a frequência da onda sonora em questão, e x_1 a distância entre a amostra e o microfone mais distante dela.

$$r = \frac{H_{12} - H_l}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (8)$$

O cálculo de r depende ainda de H_l , que é a função transferência somente da onda incidente, dada pela Equação (9), e também de H_R , que é a função de transferência somente da onda refletida, dada pela equação (10).

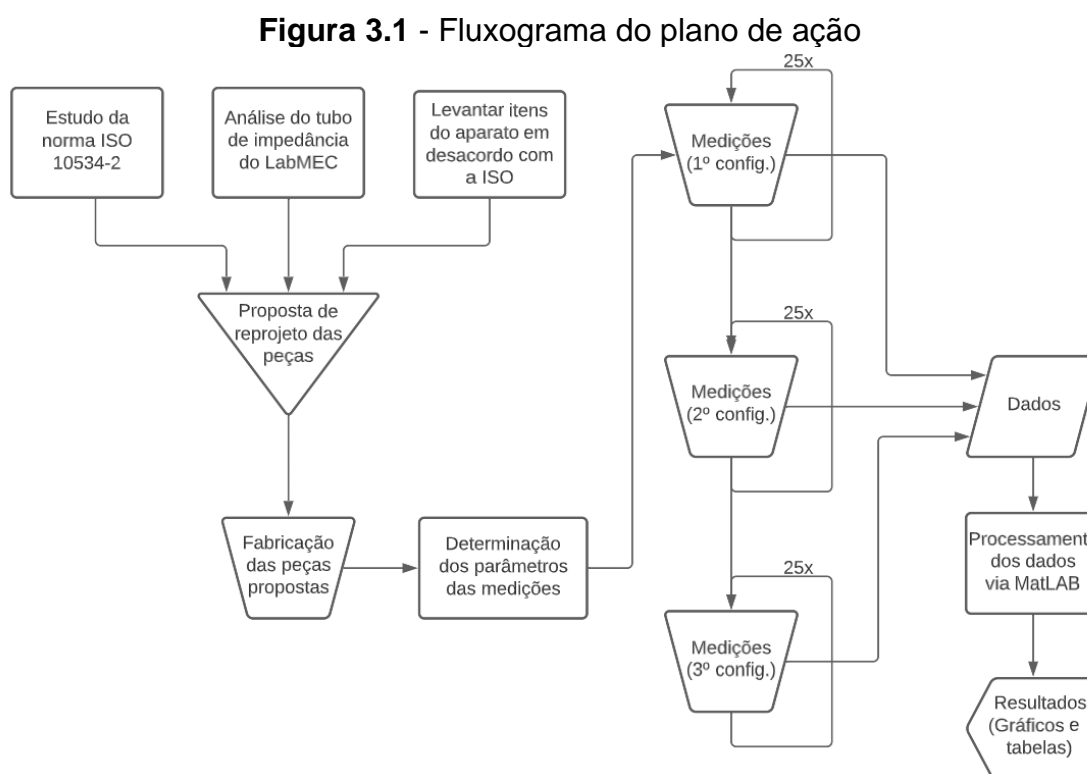
$$H_l = e^{-jk_0s} \quad (9)$$

$$H_R = e^{jk_0s} \quad (10)$$

É de suma importância seguir a metodologia descrita na regra para garantir um resultado de maior acurácia e precisão, habilitando um conhecimento mais preciso das características de um material que compõe um projeto de acústica e dessa forma garantir maior proximidade entre a teoria e a prática de um modelo.

3 METODOLOGIA

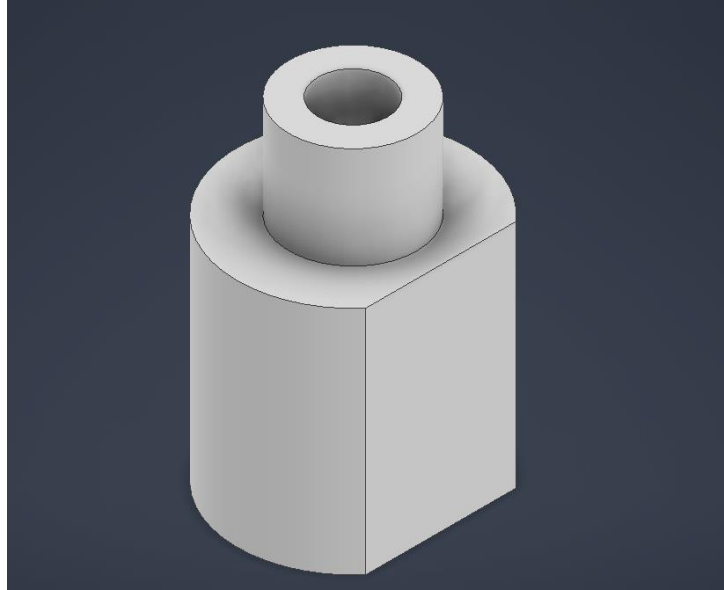
Para o fim de analisar o tubo de impedância e verificar sua adequação normativa, bem como avaliar sua construção e levantar sugestões de melhoria, será utilizada a metodologia descrita nesta seção deste trabalho, de plano de ação proposto exibido na **Figura 3.1**.



Fonte: Autor, 2023

Após a etapa de levantamento de itens discordantes entre o protótipo e a norma, expostos na introdução deste trabalho, foi proposta uma solução de bucha que faz interface entre o tubo e os microfones (**Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5**), e têm o intuito de promover o posicionamento tangente e a melhor vedação dos microfones com o tubo. Os desenhos técnicos estão disponíveis no **APÊNDICE A** e no **APÊNDICE B**.

Figura 3.2 – Perspectiva isométrica da bucha para microfone de ¼”



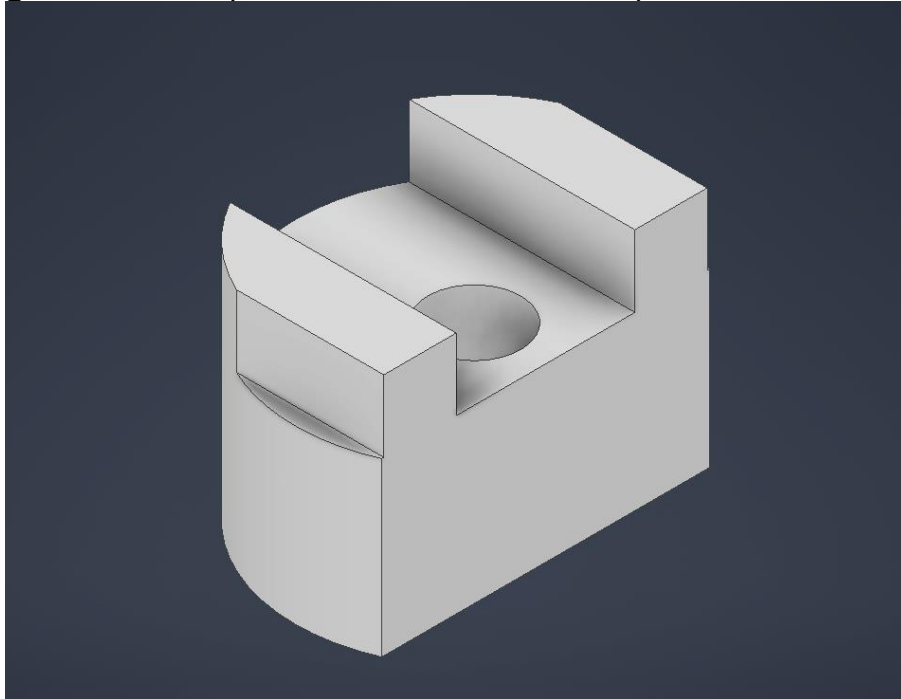
Fonte: Autor, 2023

Figura 3.3 - Montagem da bucha com o microfone de ¼”



Fonte: Autor, 2023

Figura 3.4 – Perspectiva isométrica da bucha para microfone de 1/2”



Fonte: Autor, 2023

Figura 3.5 - Montagem da bucha com o microfone de 1/2”



Fonte: Autor, 2023

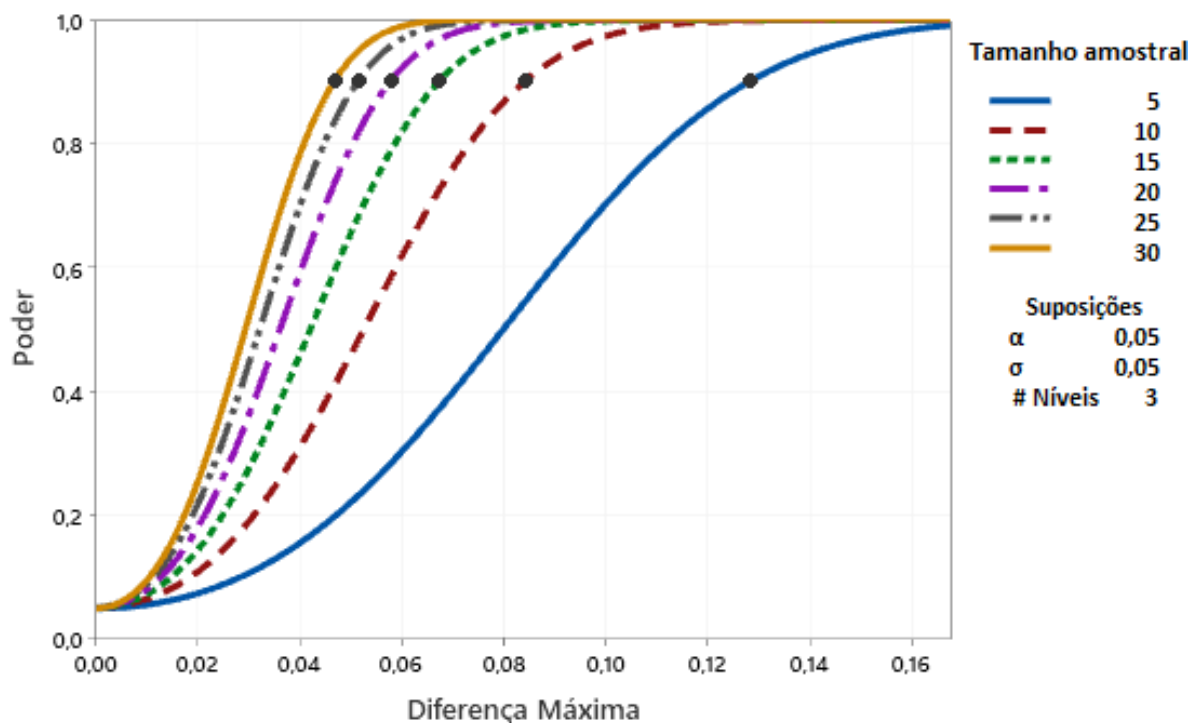
Então, o próximo passo é iniciar a fase de aquisição de dados. Para isso deve-se determinar a quantidade de medições a serem realizadas. Foi então calculado na ferramenta de planejamento de experimentos *Minitab Statistical Software* o número de amostras que devem ser realizadas em cada espécime a fim de obter um poder de teste estatístico no valor 0,9, como pode ser observado na **Tabela 3.1** e na **Figura 3.6**. Vale lembrar que poder de teste estatístico consiste na habilidade de rejeitar a hipótese nula (quando não há relação mensurável entre dois fenômenos analisados) quando ela deveria de fato ser rejeitada (LEAL, 2005).

Tabela 3.1 - Seleção do tamanho amostral

Tamanho amostral	Poder	Diferença máxima entre médias (%)
5	0,9	0,128386
10	0,9	0,084202
15	0,9	0,067345
20	0,9	0,057761
25	0,9	0,051375
30	0,9	0,046728

Fonte: Autor, 2023.

Figura 3.6 - Curva de poder dos tamanhos amostrais



Fonte: Autor, 2023

No gráfico, a curva da esquerda representa o maior espaço amostral, e cada uma sucessivamente menor ao percorrer para a direita. Com esses dados em mãos, optou-se por um tamanho amostral de 25, uma vez que se julgou satisfatória uma diferença máxima de aproximadamente 5% em relação ao coeficiente de absorção sonora, com um poder de 0,9.

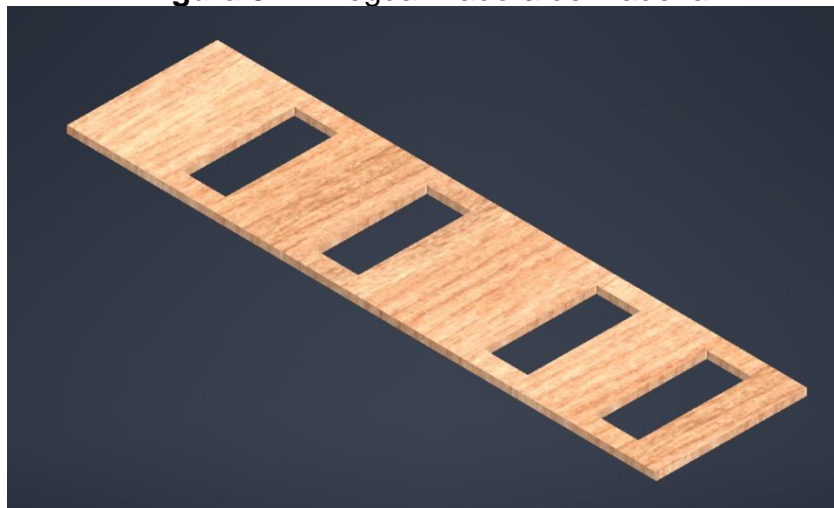
Seguindo com o planejamento do experimento, então, é proposto que a tomada de dados se decorra em três configurações do aparato, como descrito abaixo:

1. Configuração original, microfones de $\frac{1}{2}$ ", sem vaselina;
2. Ainda microfones de $\frac{1}{2}$ ", mas com suporte proposto e vaselina;
3. Microfones de $\frac{1}{4}$ ", com suporte proposto, e vaselina.

O intuito de realizar as medições em três configurações diferentes, como proposto acima, é de poder observar e quantificar o quão importante é cada alteração para o resultado final obtido.

Para tal, o primeiro momento de medição servirá como a base da qual se basearão as análises, e consiste na configuração original do tubo com os microfones de $\frac{1}{2}$ ".

A medição da segunda configuração ainda utilizará o mesmo microfone de $\frac{1}{2}$ ", porém contará com os suportes de poliacetal fabricados pelos técnicos do Laboratórios de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da UFG, que promoverá a correta vedação pelo o-ring e o correto posicionamento dos microfones para com o tubo. Contará também com as boas práticas sugeridas na norma, como promover a vedação entre as partes móveis (exceto microfones) com vaselina. Ainda, a coaxialidade do sistema em si será promovida utilizando-se de uma régua de madeira, de isométrico exibido na **Figura 3.7** e desenho técnico no **APÊNDICE C**. Dessa forma, será possível quantificar se a perda de pressão sonora por falta de vedação adequada é significativa no resultado final do experimento.

Figura 3.7 - Régua fixadora de madeira

Fonte: Autor, 2023

A última instância de medição se dará com microfones de diâmetro regulamentar ($\frac{1}{4}$ ") segundo a norma, e também será feito com um novo embuchamento em poliacetal e com as boas práticas do experimento, supracitados na configuração 2. Dessa forma é possível isolar a variável do diâmetro dos microfones, e observar o quão significativo é também essa mudança no aparato.

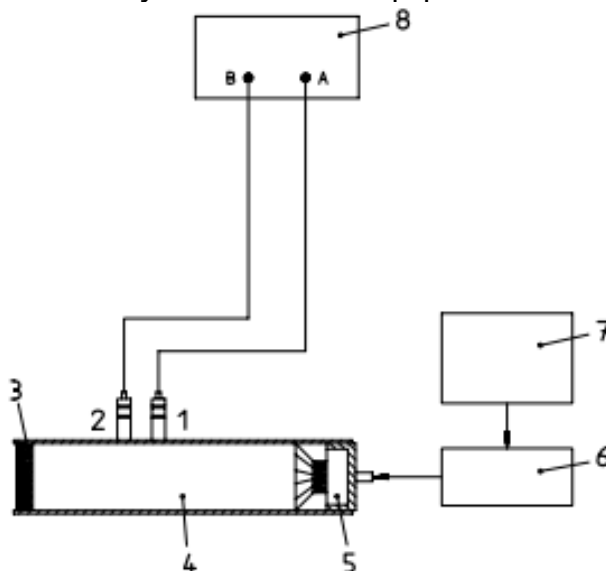
Ademais, dentro de cada configuração distinta foram testadas 2 amostras de materiais diferentes, ambas de 30mm de diâmetro, uma vez que cada material apresentará um comportamento diferente. Isso será feito com a finalidade de observar o comportamento das mudanças quando cada configuração for exposta a um diferente perfil de coeficiente de absorção sonora. Na **Figura 3.8**, estão dispostas as 2 amostras, sendo do lado esquerdo a amostra 1, com 29mm de comprimento, e do lado direito a amostra 2, com 21mm de comprimento.

Figura 3.8 - Amostra 1 (esquerda) e amostra 2 (direita)

Fonte: Autor, 2023

Seguindo adiante, será iniciado o processo de montagem do dispositivo. Está disposto abaixo na **Figura 3.9** o esquema que descreve a correta montagem do equipamento que será seguida, segundo a ISO:

Figura 3.9 - *Layout* da ISO do equipamento de testes



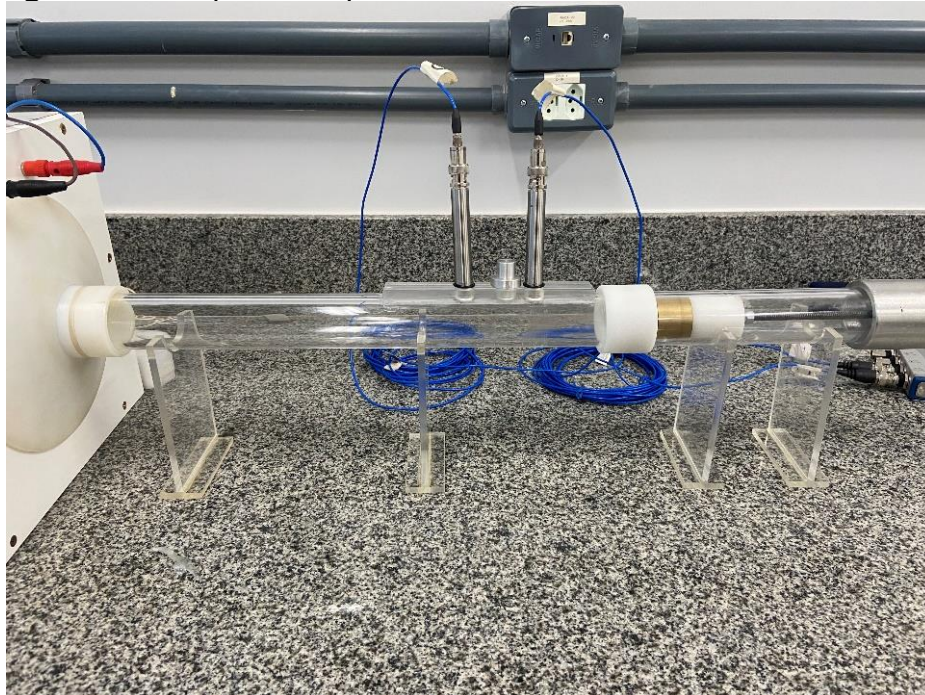
Fonte: ISO 10534-2, 1998

No qual:

1. Microfone A;
2. Microfone B;
3. Amostra de teste;
4. Tubo de impedância;
5. Alto-falante (fonte sonora);
6. Amplificador;
7. Gerador de sinal;
8. Sistema de aquisição de dados.

E seguindo o diagrama esquemático disposto acima, foi montado no Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG) o tubo de impedância em sua configuração inicial, antes das mudanças e das peças propostas neste trabalho, disposto abaixo na **Figura 3.10** e na **Figura 3.11**.

Figura 3.10 - Aparato experimental: Alto-falante, tubo e microfones



Fonte: Autor, 2023.

Figura 3.11 - Gerador de ruído e amplificador (esquerda) e placa de aquisição de dados (direita)



Fonte: Autor, 2023

No aparato experimental:

1. 2x Microfones de $\frac{1}{2}$ " PCB 377B02, com pré-amplificador PCB 426E01;
2. 2x Microfones de $\frac{1}{4}$ " Brüel & Kjær, utilizados na iteração nova do projeto;
3. Buchas fabricadas em poliacetal, utilizadas em configuração posterior;
4. Amostras de teste (numeradas 1 e 2);
5. Tubo de impedância, de acrílico, com 30mm de diâmetro interno;
6. Alto-falante Hurricane;
7. Amplificador Brüel & Kjær 2734;

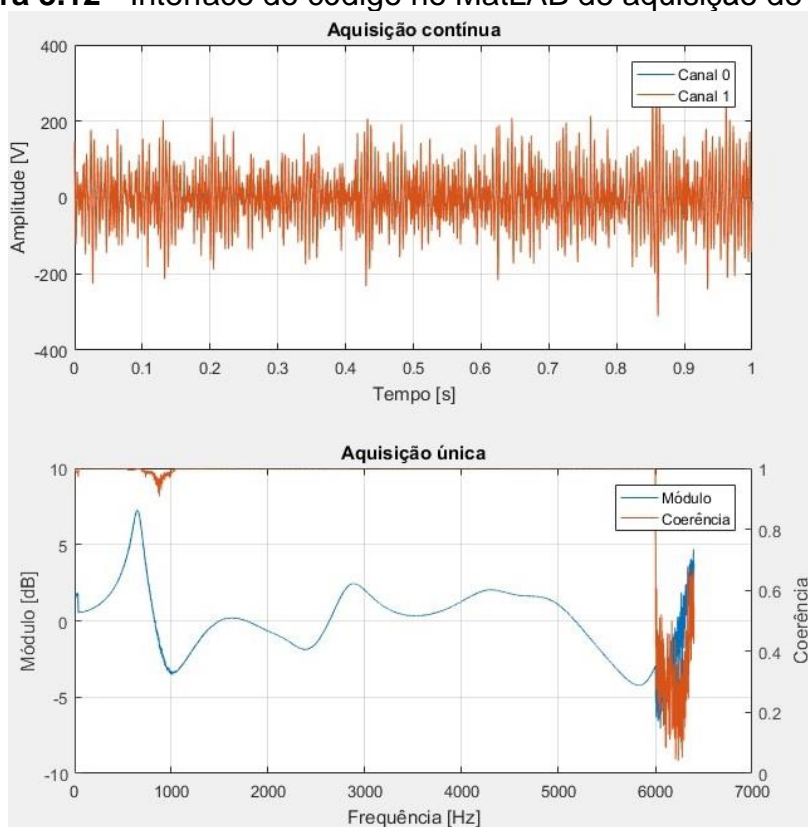
8. Gerador de sinal Leac's CA500;
9. Placa de aquisição de dados National Instruments NI USB-9262;
10. Computador com software MatLAB.

Iniciando o experimento propriamente dito, o primeiro passo é configurar o gerador de ruídos. A ISO sugere uma amplitude de sinal de pelo menos 10 dB acima do ruído ambiente. Então, foi utilizado ruído branco de 20 dB em relação ao ambiente, na configuração máxima do gerador.

A faixa operacional das frequências de medição é obtida utilizando as Equações (2) e (3), e foram expostos na seção anterior deste trabalho.

Na interface guiada desenvolvida por FAGUNDES NETO (2022), é possível obter os dados via placa de aquisição, e salvá-los em um documento de texto, que posteriormente será lido por outro código em *MatLAB* para calcular o coeficiente propriamente dito.

Figura 3.12 - Interface do código no MatLAB de aquisição de dados



Fonte: FAGUNDES NETO, 2022

Figura 3.13 - Interface guiada para configuração de aquisição de dados

The image shows a software interface for configuring data acquisition. It is divided into two main vertical panels. The left panel, titled 'Dados Aquisição', contains four sections: 'Quantidade de Canais' with radio buttons for 1, 2 (selected), 3, and 4; 'Frequência de Aquisição' with a dropdown menu set to '12800 Hz'; 'Número de Pontos' with a dropdown menu set to '12800'; and 'Dados' with a dropdown menu set to 'Tempo'. Below this panel is an 'Ações' section with four buttons: 'Iniciar', 'Único', 'Parar', and 'Salvar' (which is highlighted with a blue border). The right panel, titled 'Configurações', contains several sections: 'Função Transferência' with a dropdown menu; 'Filtro' with a dropdown menu set to 'Hanning'; 'Banda de Oitava' with a dropdown menu set to 'Sem Banda de Oitava'; 'Espectro' with two input fields, 'Número de Médias' and 'Médias Completadas', both set to '30'; 'Trigger' with two checkboxes, 'Ativar' and 'Plotar', both unchecked; 'Estatística' with two checkboxes, 'Continua' and 'Única', both unchecked; and two large buttons at the bottom: 'Configurações Canais' and 'Configurações Trigger'.

Fonte: FAGUNDES NETO, 2022

Entre cada medição, os microfones foram desmontados e reinsertados, e a amostra foi removida e reinsertada no tubo, para eliminar possíveis erros sistemáticos.

O mesmo procedimento foi repetido após a fabricação das peças propostas, com o microfone de meia polegada e com o de quarto de polegada, e na **Figura 3.14**, **Figura 3.15**, **Figura 3.16** e **Figura 3.17** é possível observar os suportes novos, bem como na **Figura 3.18** o aparato novo por completo.

Figura 3.14 - Buchas de poliacetal para microfone de ¼"



Fonte: Autor, 2023

Figura 3.15 - Buchas de poliacetal para microfone de ½"



Fonte: Autor, 2023

Figura 3.16 - Buchas para ¼" montadas no tubo de impedância



Fonte: Autor, 2023.

Figura 3.17 - Buchas para ½" montadas no tubo de impedância



Fonte: Autor, 2023.

Figura 3.18 - Aparato experimental completo atualizado



Fonte: Autor, 2023.

Após o procedimento de coleta de todos os dados das três configurações de medição propostas para cada um dos dois materiais, a manipulação dos dados foi feita mediante um código desenvolvido no MatLAB.

A rotina do código consiste na execução da base algébrica descrita pelas equações (4) a (10). Os dados de pressão sonora dos microfones, coletados pela placa de aquisição de dados, são inseridos no software, que por sua vez tem como saída o gráfico do coeficiente de absorção sonora por frequência e por banda de oitava de cada amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Munidos, finalmente, dos dados e dos gráficos provenientes da metodologia proposta, neste capítulo serão comparados e discutidos os resultados obtidos.

Com a finalidade de isolar as variáveis envolvidas nas mudanças propostas nesse aparato experimento e compreender melhor a influência dos itens alterados, são propostos a seguir alguns cenários comparativos envolvendo 3 combinações de resultados, dentro das 3 diferentes configurações de cada fase de medição de dados, comparando-as em pares. Em todos os cenários, ainda, serão apresentados os resultados para as duas amostras de diferentes espumas acústicas.

A configuração 1 é o protótipo original, inalterado, utilizando os microfones de 1/2", e ainda com o procedimento experimental anterior, cujos problemas foram discutidos anteriormente.

A configuração 2 consiste na primeira fase de mudanças do protótipo. Nela, as buchas de poliacetal já estão em uso, e estão também aplicadas as mudanças em relação à vedação enunciadas na norma relativo à utilização de vaselina (para promover a vedação entre as partes móveis do tubo), e a bucha de poliacetal (que auxilia no correto posicionamento tangencial do microfone com a face interior do tubo e uma melhor vedação por parte do o-ring).

Já a configuração 3 é, portanto, a qual teoricamente se aproxima mais dos parâmetros solicitados pela norma, respeitando o diâmetro máximo do microfone ditado pelo espaçamento dos furos que os recebe. Ainda, é importante a utilização da bucha com tolerâncias geométricas mais justas, um o-ring devidamente posicionado, microfone devidamente tangente à superfície interna do tubo, e vaselina para vedação das seções do tubo.

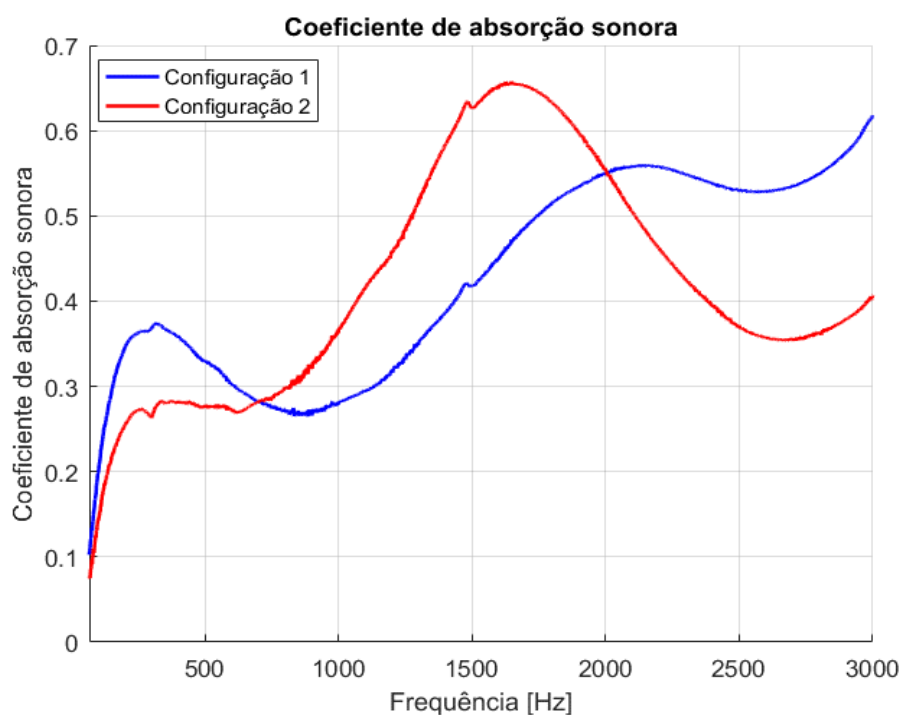
Por fim, um gráfico contendo juntos os resultados obtidos pelas 3 configurações, a fim de ter uma ideia da evolução das mudanças propostas.

Dispondo-se do código de FAGUNDES NETO (2022), foram gerados os gráficos que serão apresentados a seguir.

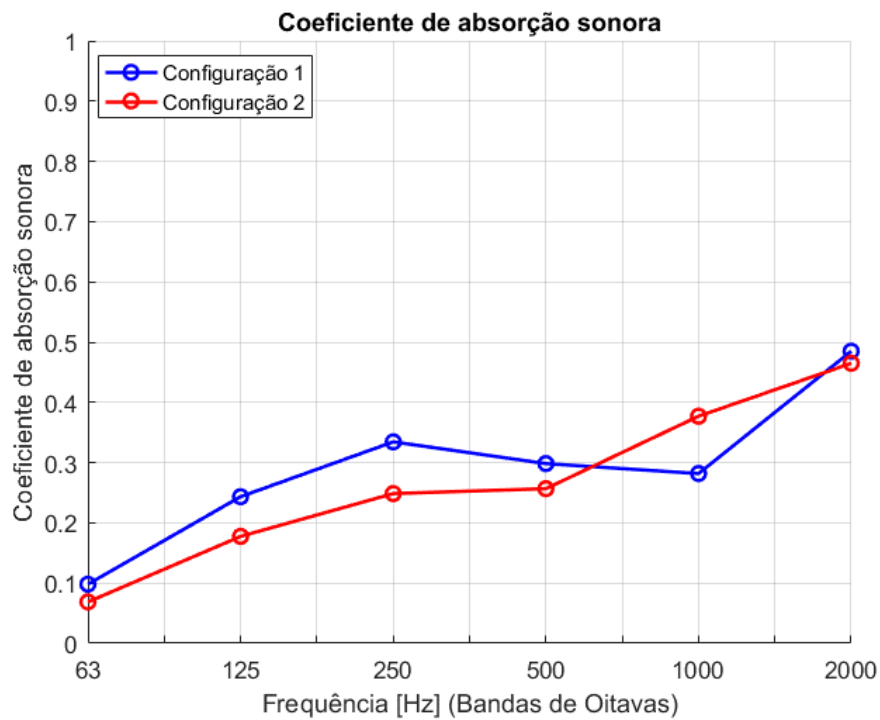
4.1 CENÁRIO 1: CONFIGURAÇÃO 1 VS CONFIGURAÇÃO 2

Então, o primeiro cenário comparativo foi levantado com o intuito de observar isoladamente a influência que as falhas de posicionamento dos microfones e das peças do tubo de impedância têm sobre as curvas de coeficiente de absorção do material. Por hora, o fato do microfone de $\frac{1}{2}$ " não atender às exigências da norma está sendo ignorado. Os resultados obtidos estão dispostos na **Figura 4.1**, **Figura 4.2**, **Figura 4.3** e na **Figura 4.4**.

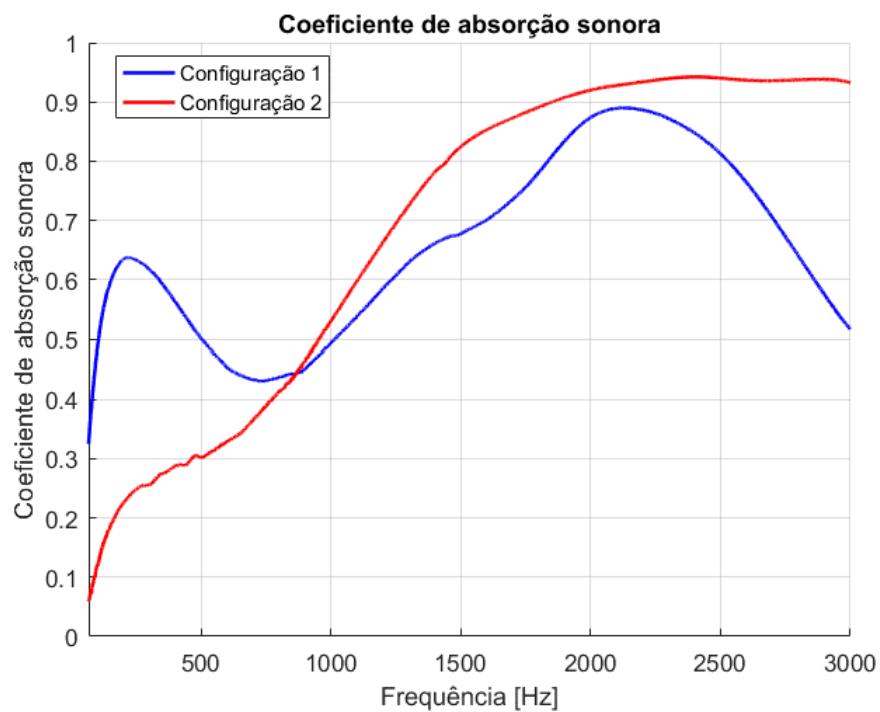
Figura 4.1 - Cenário 1, material 1, faixa de frequências



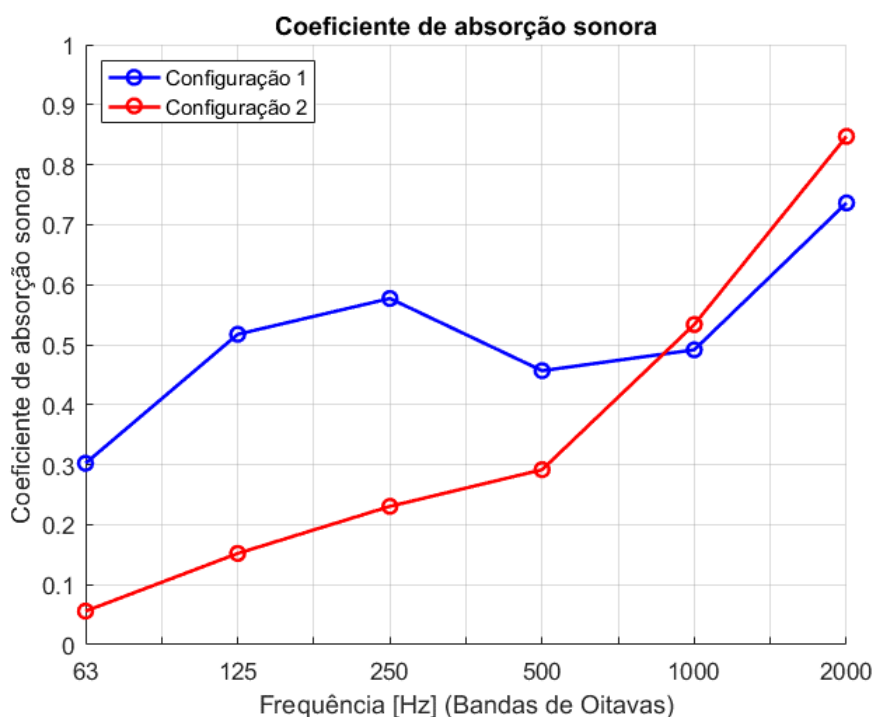
Fonte: Autor, 2023

Figura 4.2 - Cenário 1, material 1, bandas de oitava

Fonte: Autor, 2023

Figura 4.3 - Cenário 1, material 2, faixa de frequências

Fonte: Autor, 2023

Figura 4.4 - Cenário 1, material 2, bandas de oitava

Fonte: Autor, 2023

Tabela 4.1 - Resultados do cenário 1

	CENÁRIO 1			
	MATERIAL 1		MATERIAL 2	
	CONFIG. 1	CONFIG. 2	CONFIG. 1	CONFIG. 2
α MÉDIO	0,5446	0,4952	0,5362	0,7602
DESVIO PADRÃO	0,0119	0,0254	0,0220	0,0105
MÉDIA DAS DIFERENÇAS	0,2124		0,2959	

Fonte: Autor, 2023

Observando os resultados do cenário 1, então, foi claramente evidenciado que os itens citados afetam as curvas. É notório a diferença de promover uma vedação mais efetiva por meio da vaselina, da bucha de poliacetal e do o-ring. Também é possível dizer que o posicionamento tangencial dos microfones em relação ao interior do tubo tem sua parcela de responsabilidade nessa diferença.

Apesar de o α médio ter variado pouco no material 1, observando as curvas, as quais representam mais fidedignamente o comportamento do material, é notória a diferença causada, e a média absoluta das diferenças ponto a ponto da frequência ao longo da medição foi de 0,2124 para o material 1 e

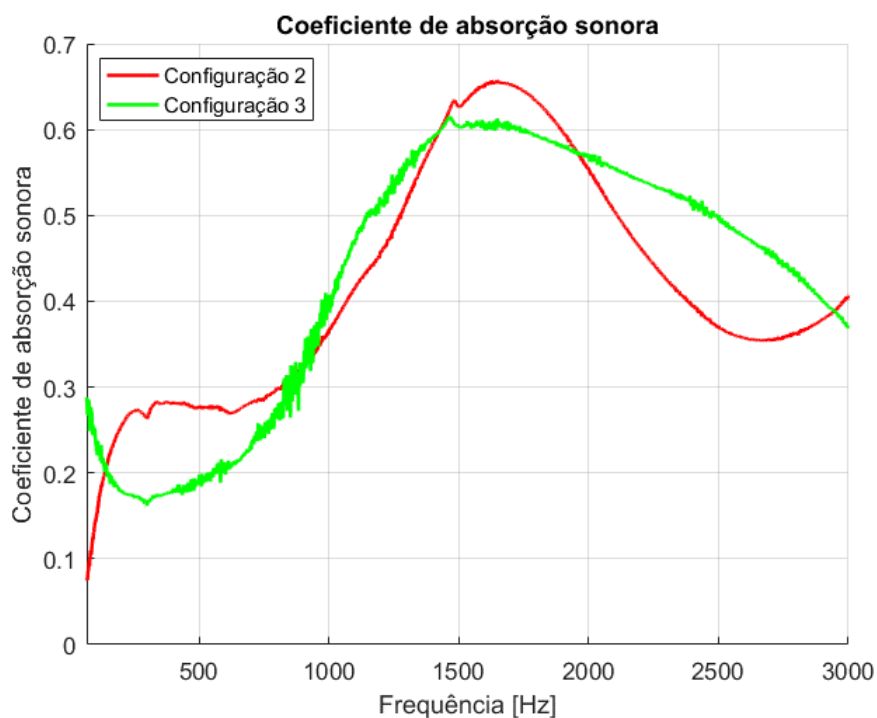
0,2959 para o material 2. Vale lembrar que o coeficiente é uma porcentagem, variando entre 0 e 1.

4.2 CENÁRIO 2: CONFIGURAÇÃO 2 VS CONFIGURAÇÃO 3

Seguindo em frente, a proposição do cenário 2 foi pensada com a finalidade de isolar as outras falhas do projeto e voltar a atenção somente ao fato de o microfone utilizado anteriormente ser de um diâmetro não regulamentar perante a ISO.

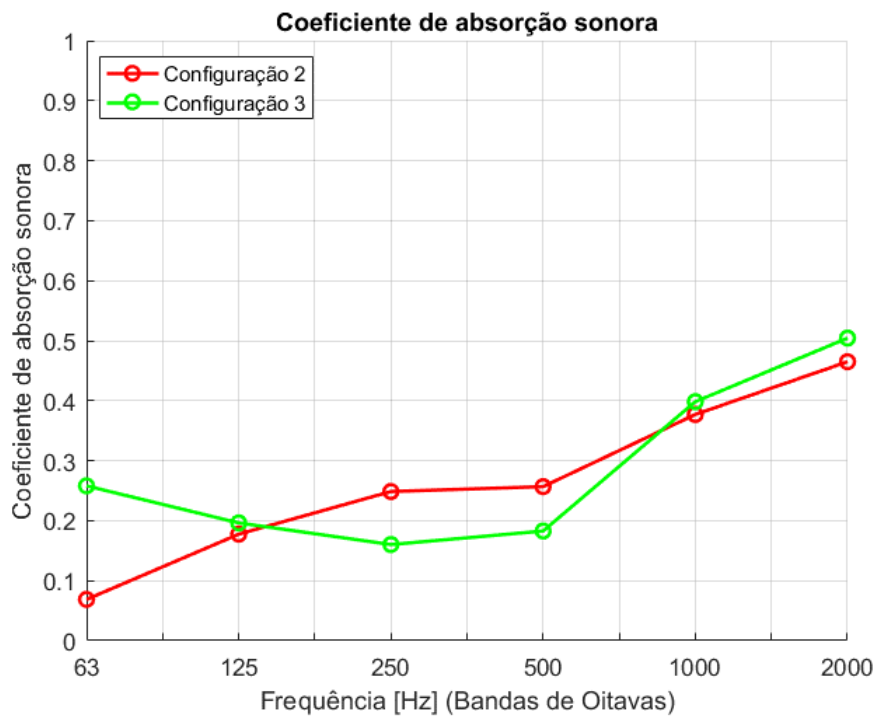
Sendo assim, nessa comparação será utilizada a bucha de poliacetal nas duas configurações, bem como a vaselina nas juntas das partes móveis, permitindo visualizar os efeitos da utilização do microfone de diâmetro correto, assumindo que o restante das variáveis de posicionamento e vedação sejam razoavelmente similares. Os resultados obtidos nesse cenário de medição estão na **Figura 4.5**, **Figura 4.6**, **Figura 4.7**, **Figura 4.8**, e na **Tabela 4.2**.

Figura 4.5 - Cenário 2, material 1, faixa de frequências



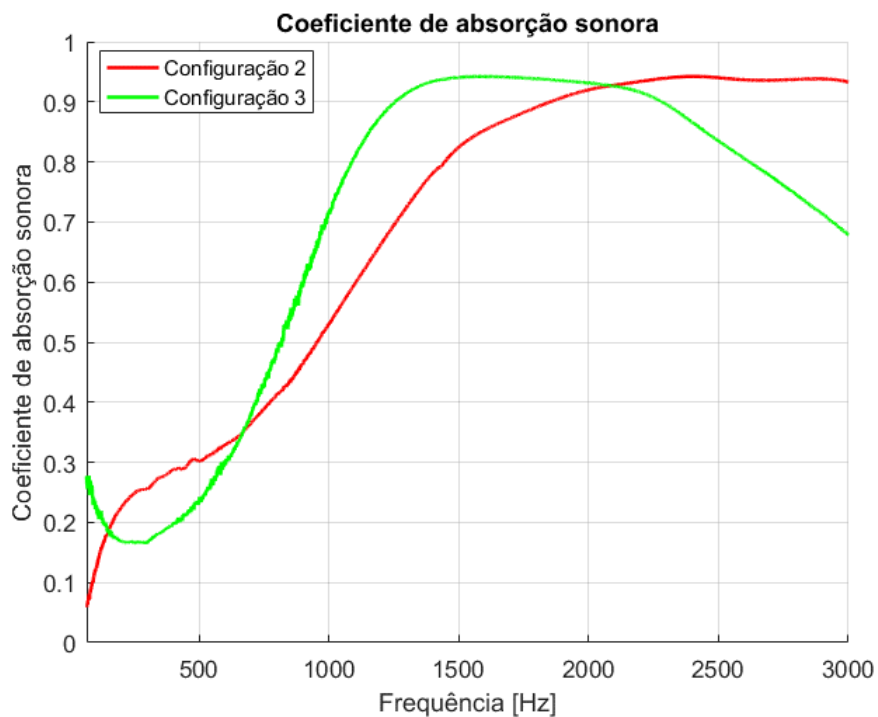
Fonte: Autor, 2023

Figura 4.6 - Cenário 2, material 1, bandas de oitava

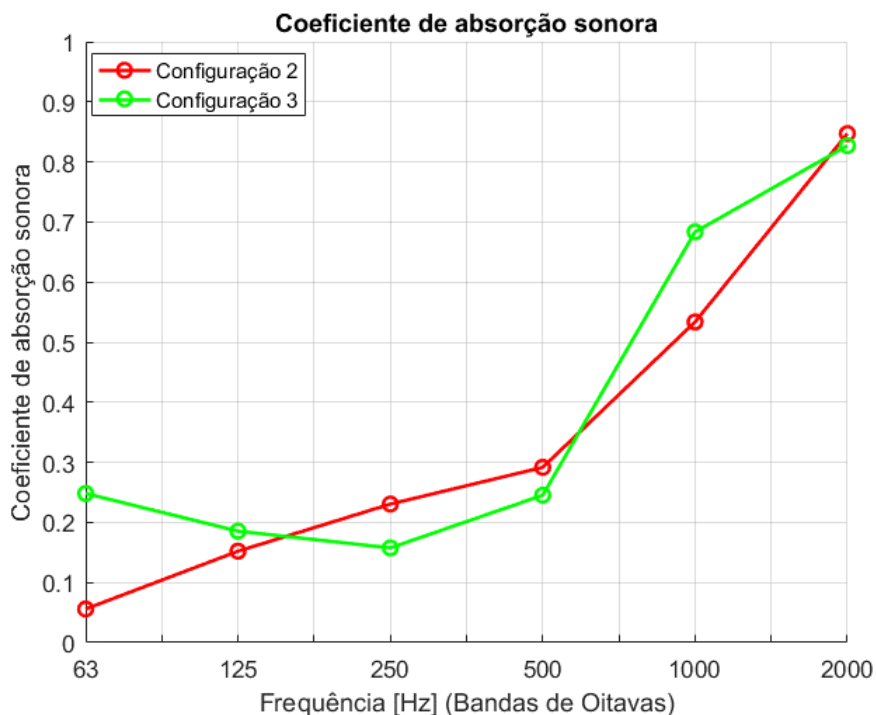


Fonte: Autor, 2023

Figura 4.7 - Cenário 2, material 2, faixa de frequências



Fonte: Autor, 2023

Figura 4.8 - Cenário 2, material 2, bandas de oitava

Fonte: Autor, 2023

Tabela 4.2 - Resultados do cenário 2

	CENÁRIO 2			
	MATERIAL 1		MATERIAL 2	
	CONFIG. 2	CONFIG. 3	CONFIG. 2	CONFIG. 3
α MÉDIO	0,4952	0,4948	0,7602	0,7479
DESVIO PADRÃO	0,0117	0,0172	0,0105	0,0106
MÉDIA DAS DIFERENÇAS	0,0932		0,1337	

Fonte: Autor, 2023

Mais uma vez, então, a proposta de mudança do protótipo mostrou surtir efeito. Observando os resultados do cenário 2, fica claro que a utilização do microfone adequado afetou a distribuição do α , tanto nas amplitudes quanto no comportamento da curva.

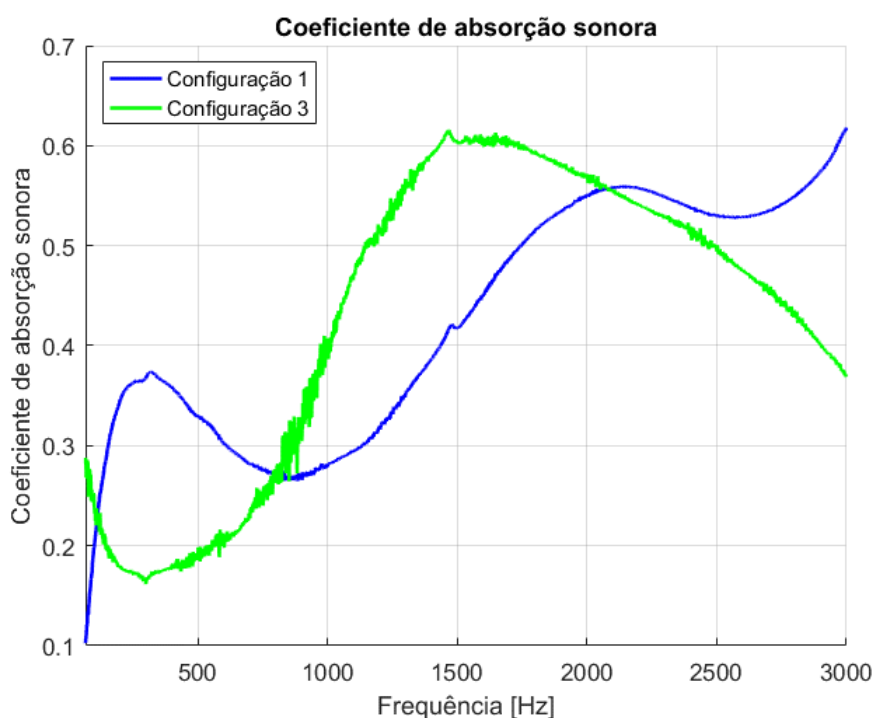
Novamente o α médio variou pouco nos dois materiais, porém no comportamento da curva é notória a diferença, e a média absoluta das diferenças ponto a ponto da frequência ao longo da medição foi de 0,0932 para o material 1 e 0,1337 para o material 2.

Com esses resultados, observando especificamente a média das diferenças entre o cenário 1 e o cenário 2, é seguro dizer que o efeito causado pela bucha-suporte de poliacetal, o cuidado com a coaxialidade dos tubos, e a vaselina nas junções causou um impacto maior no resultado dos experimentos do que a troca para o microfone de diâmetro adequado.

4.3 CENÁRIO 3: CONFIGURAÇÃO 1 VS CONFIGURAÇÃO 3

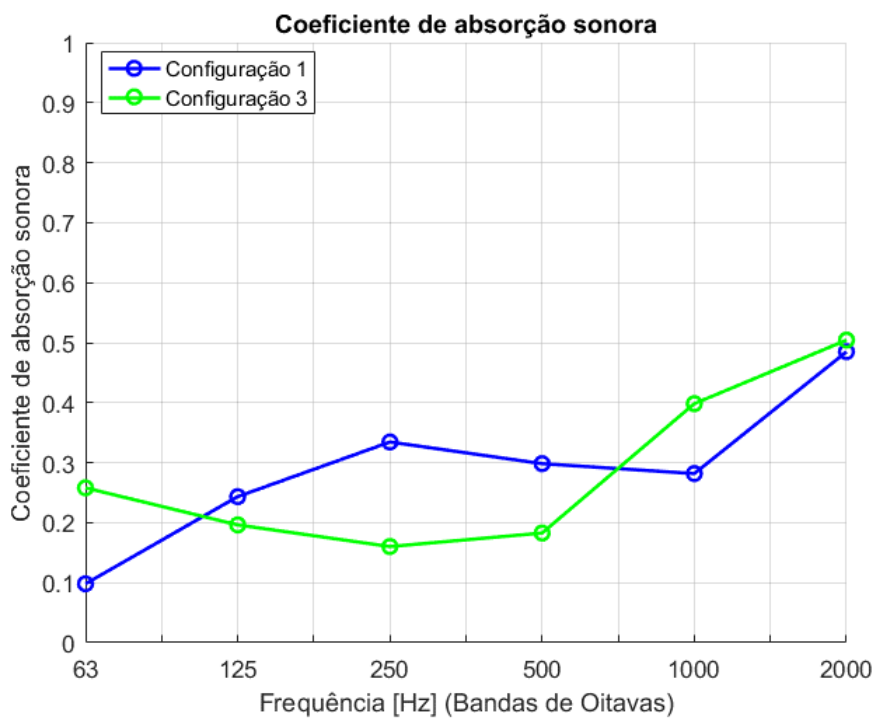
Esse último cenário foi proposto para observar a diferença de comportamento como um todo, sem isolar nenhuma variável. Nele, será observável os efeitos juntos tanto do cenário 1 quanto do cenário 2, e será evidenciada a diferença entre o protótipo original anterior e o protótipo novo proposto. Os resultados do cenário 3 encontram-se abaixo (**Figura 4.9**, **Figura 4.10**, **Figura 4.11** e **Figura 4.12**, e na **Tabela 4.3**).

Figura 4.9 - Cenário 3, material 1, faixa de frequências



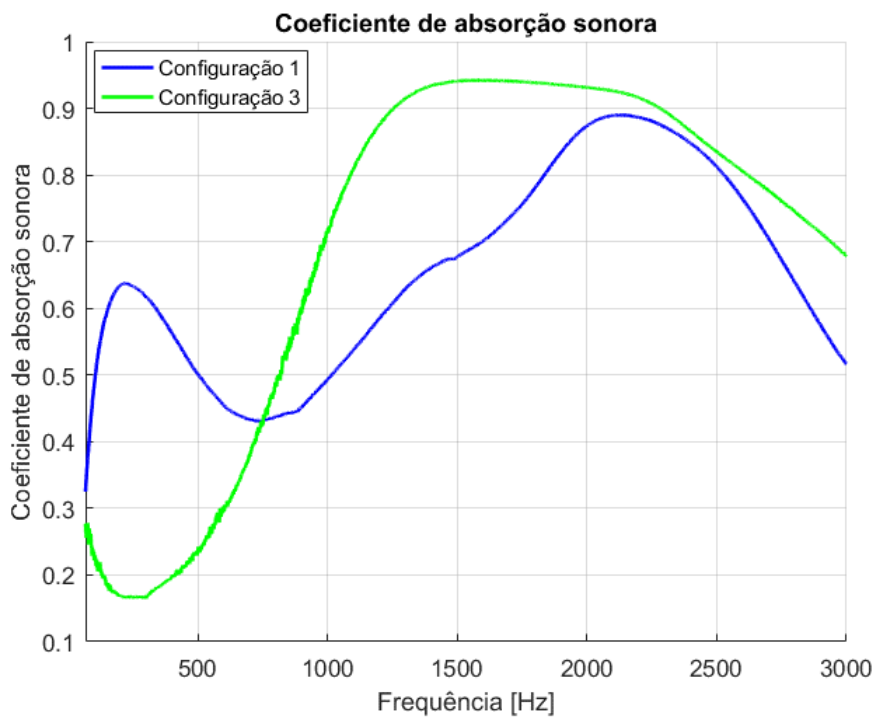
Fonte: Autor, 2023

Figura 4.10 - Cenário 3, material 1, bandas de oitava

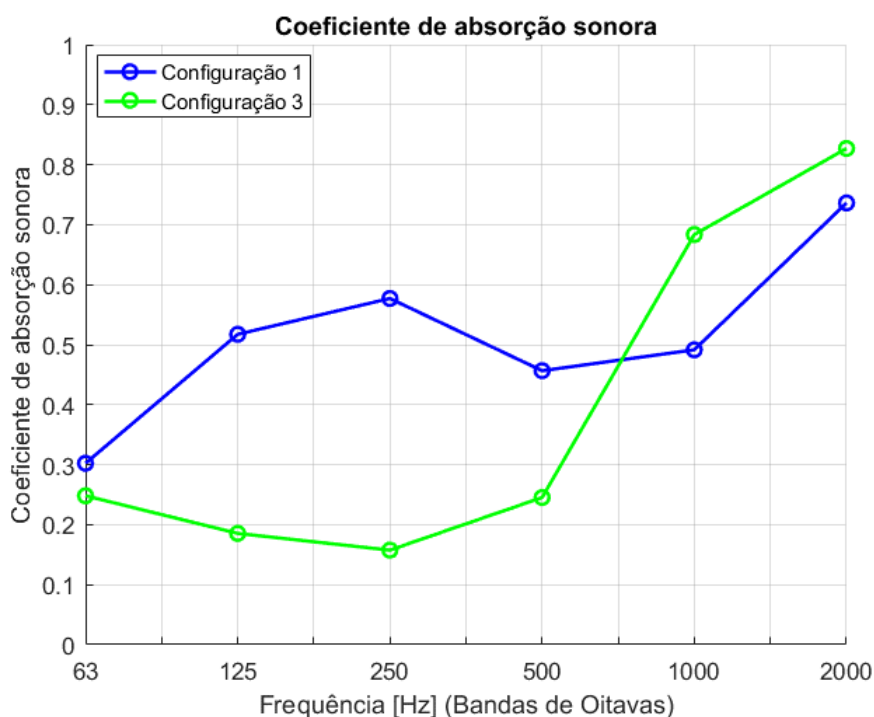


Fonte: Autor, 2023

Figura 4.11 - Cenário 3, material 2, faixa de frequências



Fonte: Autor, 2023

Figura 4.12 - Cenário 3, material 2, bandas de oitava

Fonte: Autor, 2023

Tabela 4.3 - Resultados do cenário 3

	CENÁRIO 3			
	MATERIAL 1		MATERIAL 2	
	CONFIG. 1	CONFIG. 3	CONFIG. 1	CONFIG. 3
α MÉDIO	0,5446	0,4948	0,5362	0,7479
DESVIO PADRÃO	0,0217	0,0172	0,0220	0,0106
MÉDIA DAS DIFERENÇAS	0,2477		0,287	

Fonte: Autor, 2023

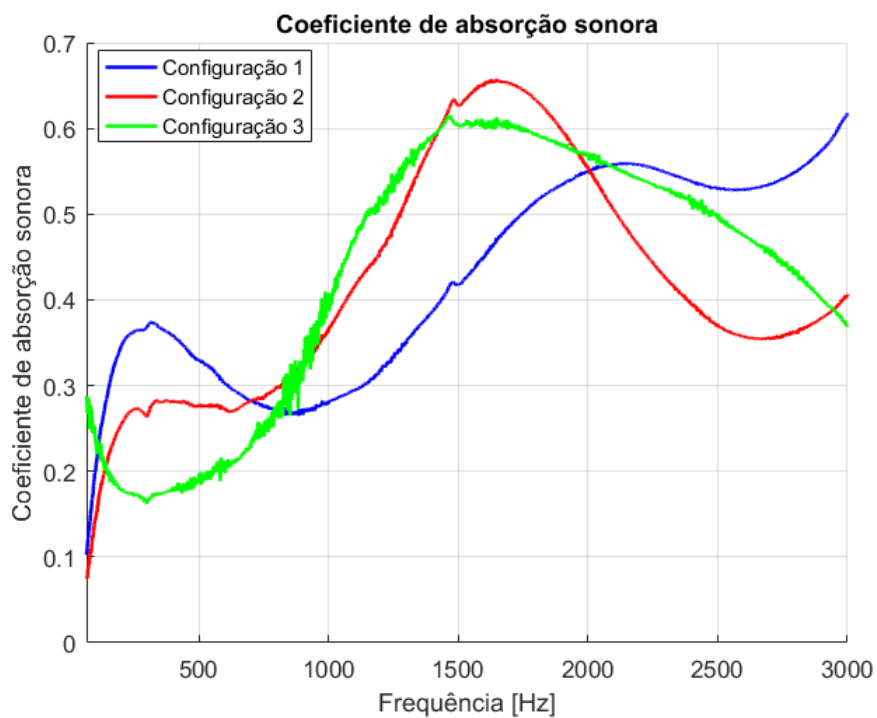
E mais uma vez é bem nítida a diferença entre as curvas, com diferenças mais expressivas no coeficiente de absorção sonora médio no material 2. Grandes diferenças também são observadas no comportamento das curvas, especialmente nas faixas de frequência até em torno de 750 Hz.

Evidencia-se novamente que o correto cumprimento dos procedimentos e boas práticas enunciadas pelo procedimento padrão regulamentar da ISO pode levar à obtenção de dados mais fiéis à realidade.

4.4 VISÃO GERAL DOS RESULTADOS

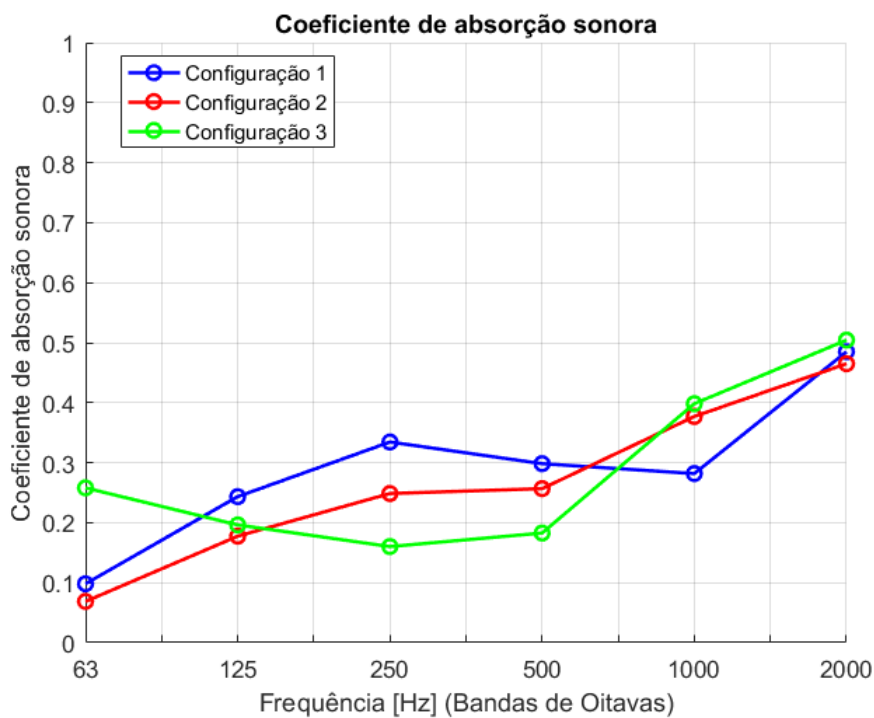
Por fim, são mostrados na **Figura 4.13**, **Figura 4.14**, **Figura 4.15** e na **Figura 4.16** os gráficos contendo as curvas do coeficiente de absorção sonora para faixa de frequências e bandas de oitavas para as 3 configurações propostas, e os resultados na **Tabela 4.4** e na **Tabela 4.5**.

Figura 4.13 - Resultados gerais, material 1, faixa de frequências



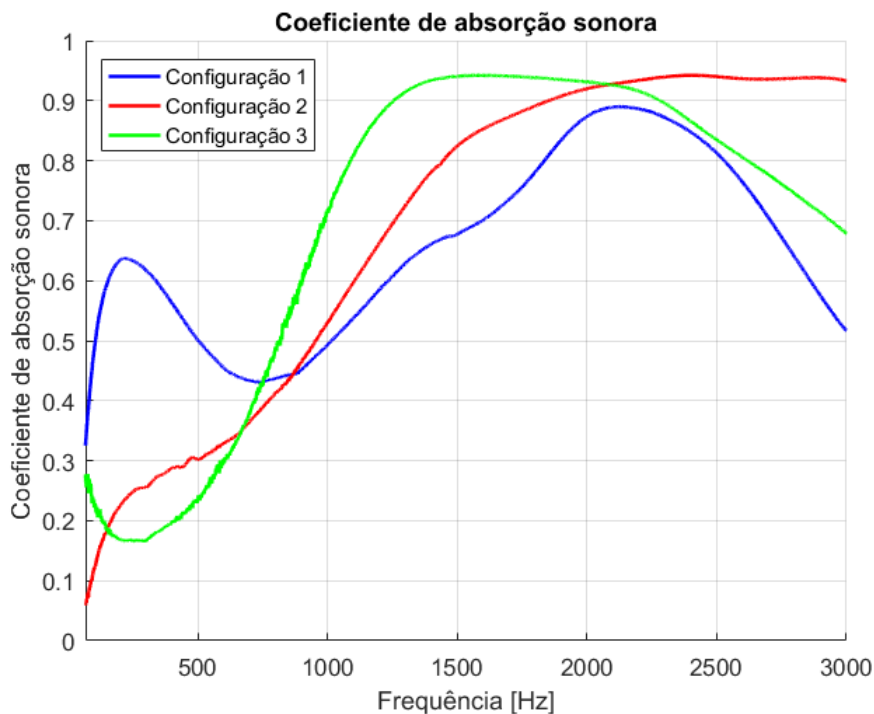
Fonte: Autor, 2023

Figura 4.14 - Resultados gerais, material 1, bandas de oitava

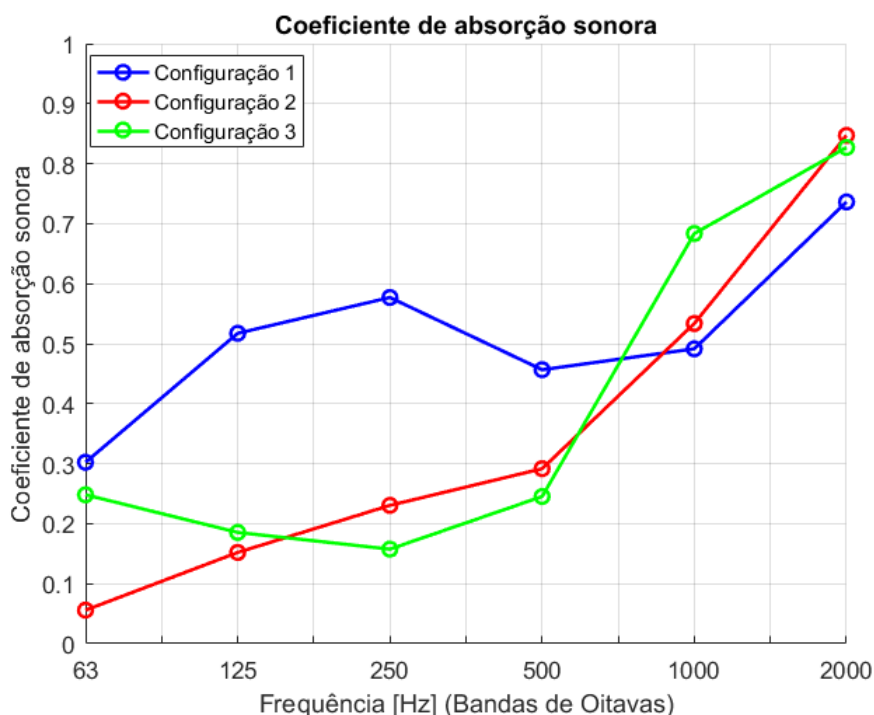


Fonte: Autor, 2023

Figura 4.15 - Resultados gerais, material 2, faixa de frequências



Fonte: Autor, 2023

Figura 4.16 - Resultados gerais, material 2, bandas de oitava

Fonte: Autor, 2023

Tabela 4.4 - Resultados gerais, material 1

	MATERIAL 1		
	CONFIG. 1	CONFIG. 2	CONFIG. 3
α MÉDIO	0,5446	0,4952	0,4948
DESVIO PADRÃO	0,0239	0,0117	0,0172

Fonte: Autor, 2023

Tabela 4.5 - Resultados gerais, material 2

	MATERIAL 2		
	CONFIG. 1	CONFIG. 2	CONFIG. 3
α MÉDIO	0,5362	0,7602	0,7479
DESVIO PADRÃO	0,0220	0,0105	0,0106

Fonte: Autor, 2023

Nesses gráficos é observável que as curvas das configurações 2 e 3 apresentam um comportamento, ou uma tendência, mais próximas entre si, enquanto a configuração 1 exibe uma forma distinta. Isso vai ao encontro da observação supracitada sobre o fato de a mudança proposta pelas buchasuporte, montagem e vedação do tubo são muito mais expressivas do que a mudança do diâmetro do microfone, que apesar de ser um enunciado da ISO e surtir efeito, ainda foi uma diferença menor.

Outro fato é que a utilização do microfone correto, de ¼”, gerou um nível maior de ruído ao longo da curva, como observável na **Figura 4.5**, **Figura 4.9**, e **Figura 4.13**. Esse fato deve ser isolado e investigado no futuro.

Portanto, apesar de evidente os efeitos das mudanças executadas, ainda é necessário a obtenção de material com curvas conhecidas a fim de validar os dados obtidos. O fato de a mudança ser relativamente grande, mas que as configurações 2 e 3 apresentarem comportamentos relativamente similares por fim é algo positivo.

5 CONCLUSÃO

Enfim, é inegável e expressiva a diferença que as mudanças propostas surtiram nos dados coletados utilizando o protótipo do tubo de impedância. Em todos os três cenários propostos, e com os dois materiais avaliados, foi possível observar nítidas diferenças entre as curvas de antes e depois. Importante também foi poder observar na prática os pesos dos diferentes efeitos na mudança geral, por meio da proposição de comparações entre cenários que isolaram variáveis para mensurar separadamente duas grandes mudanças: o diâmetro do microfone, o posicionamento do microfone em relação a superfície interna do tubo, e a vedação de modo geral do aparato.

Em geral, é possível dizer que o plano de ação proposto foi bem sucedido. Os pontos nos quais o protótipo original divergia da norma, e que foram submetidos a propostas de intervenção, de fato demonstraram que fizeram diferença no resultado final, como observável na **Figura 4.13**, **Figura 4.14**, **Figura 4.15**, **Figura 4.16**, na **Tabela 4.4** e **Tabela 4.5**.

A proposta de intervenção ainda continua indo ao encontro das vantagens de realizar medições com o tubo de impedância quando comparado com os outros métodos de medição apresentados na linha do tempo da **Figura 1.1**, na introdução deste trabalho. Isso devido ao fato de que as peças novas propostas e fabricadas não gastaram muito volume de matéria prima, e o poliacetal é um material barato. A vaselina também é relativamente barata, mas apresenta as desvantagens de ser um item consumível e de adicionar um passo a mais tanto na montagem quanto na desmontagem do aparato.

Um problema com a metodologia apresentada é que as amostras disponíveis no LabMEC são de material de especificações desconhecidas. Foi analisado no início da linha do tempo deste trabalho a possibilidade de adquirir novas espumas para obtenção de novas amostras, com a esperança de encontrar alguma da qual a fabricante disponibiliza o gráfico por completo do comportamento do coeficiente de absorção sonora ao longo de toda a faixa do espectro de frequências. Quando muito, em raras exceções, os catálogos mostram um coeficiente médio. Por isso, não foi possível confrontar os resultados obtidos com uma curva nominal de fabricante. Só é possível observar

que o cumprimento dos parâmetros da ISO resultou em diferenças significativas nas curvas.

Outro problema encontrado foi que, ao trabalhar com os microfones de $\frac{1}{4}$ ", foi possível observar um certo ruído em suas curvas do coeficiente de absorção sonora. Com os microfones de $\frac{1}{2}$ ", essa irregularidade na superfície da curva não era notável. É possível que tenha sido causado por alguma interferência ou defeito, mas também é possível que o microfone de $\frac{1}{4}$ " seja mais sensível que o de $\frac{1}{2}$ " e por isso seja mais capaz de observar pequenas variações.

Sabendo disso então, apresenta-se as seguintes sugestões para futuros trabalhos:

- Isolar e investigar a causa do ruído na curva dos dados obtidos quando utilizado o microfone de $\frac{1}{4}$ ";
- Revisitar o tubo de acrílico na questão das junções, optando por uma solução mais robusta, como um flange com parafusos, que é utilizada comercialmente;
- Tentar entrar em contato com alguma fabricante para estudar a possibilidade de obtenção de amostras com uma conhecida curva de α vs. frequência para validar o protótipo;
- Comparar os resultados obtidos com resultados obtidos através de outros métodos de medição do α ;
- Comparar os resultados obtidos pelo protótipo do LabMEC com algum outro tubo de impedância comercial, ou de outra instituição.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISTAFA, Sylvio R. Acústica aplicada ao controle do ruído. Editora Blucher, 2018.

GERGES, Samir NY. Ruído: fundamentos e controle. In: Ruído: fundamentos e controle. 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10534-2: Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes —Part 2: Transfer-function method. 1998.

PAIXAO, G. F.; FAGUNDES NETO, M. G. Projeto e Construção de um Tubo de Impedância para Medição do Coeficiente de Absorção Sonora pela ISO 10534-2:1998. In: 18º CONPEEX - Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão, 2021, Goiânia-GO. A transversalidade da ciência, tecnologia e inovações para o planeta. Goiânia-GO: Universidade Federal de Goiás, 2021. p. 1283-1283

GUERRA, P. A. G.; FAGUNDES NETO, M. G.. Acústica de salas: influência e modelagem da posição de materiais de absorção sonora na característica acústica de salas de aula, 2018.

MELLO, L. D.; FAGUNDES NETO, M. G.. Estudo Experimental do Leiaute de Disposição dos Materiais de Absorção Sonora em uma Sala. In: 1º Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFG, 2021, Goiânia-GO. 1º Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFG. Goiânia-GO: Universidade Federal de Goiás, 2021.

ASSIS, L. N.; MELLO, L. D.; FAGUNDES NETO, M. G.. Estudo Experimental Do Leiaute De Disposição Dos Materiais De Absorção Sonora em uma Sala Vazia. In: III Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, 2022. III Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, 2022.

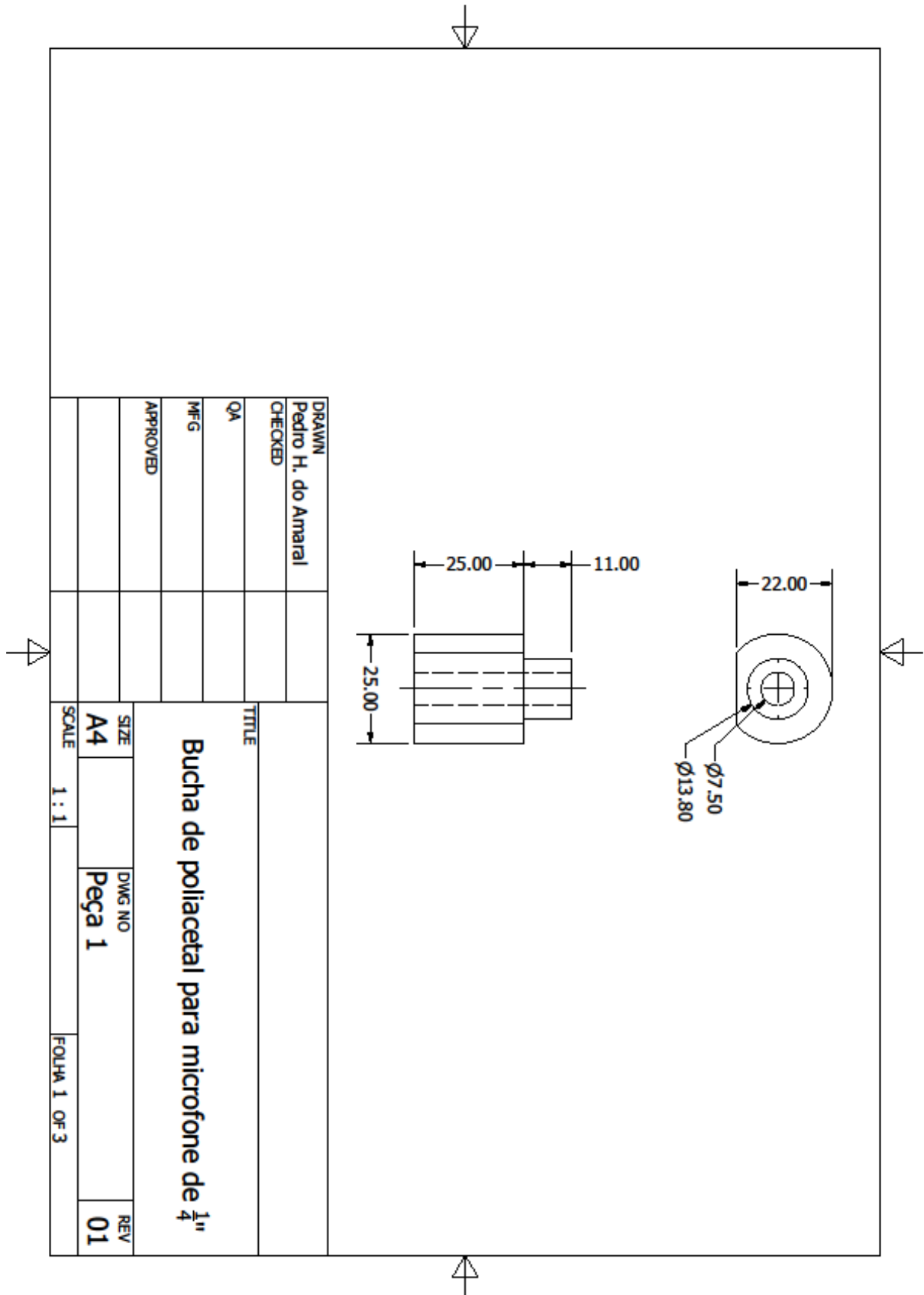
BARBOSA, M. S. N.; FAGUNES NETO, M.G. Medição do coeficiente de absorção sonora de uma espuma de acústica pela técnica de aproximação de ondas planas in situ. 2022.

FOTOS DE TUBO DE IMPEDÂNCIA-KUNDT TFACOUSTICS ACUPRO. Disponível em: <<http://www.mra.pt/industria/produtos/instrumentacao-e-ensaios/acustica-e-vibracoes/tubos-de-impedancia-kundt/tubo-de-impedancia-kundt-tfacoustics-acupro/fotos/>>. Acesso em: 30 jan. 2023.

LEAL, G.S., SILVA, D.A.O., and SOPELETE, M.C. Conceitos básicos de bioestatística. In: MINEO, J.R., SILDA, D.A.O., SOPELETE, M.C., LEAL, G.S., VIDIGAL, L.H.G., TÁPIA, L.E.R., and BACCHIN, M.I. Pesquisa na área biomédica: do planejamento à publicação [online]. Uberlândia EDUFU, 2005. pp. 137-180. ISBN: 978-85-7078-523-7. <https://doi.org/10.7476/9788570785237.0007>

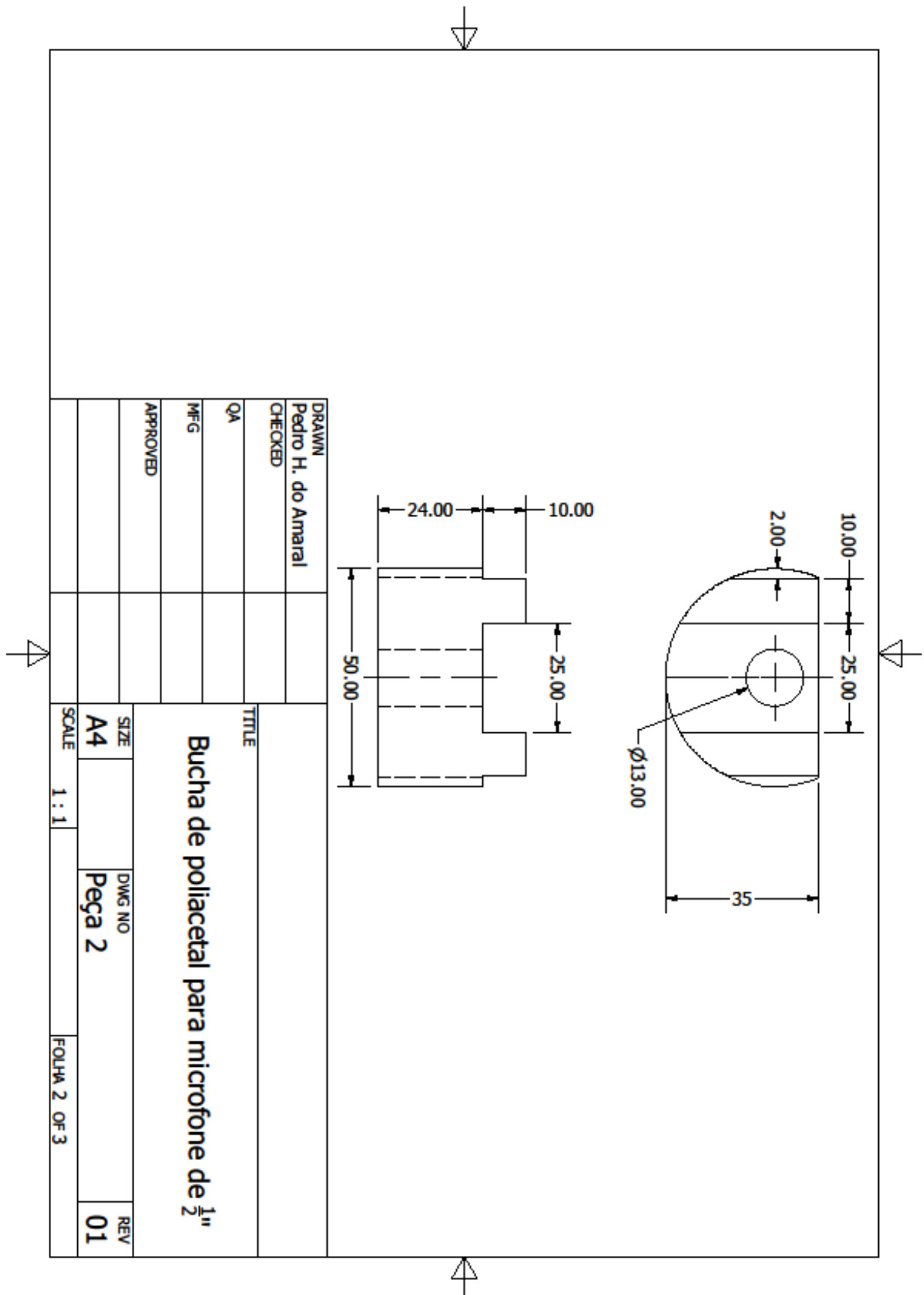
7 APÊNDICE A

Desenho técnico da peça 1.



8 APÊNDICE B

Desenho técnico da peça 2.



9 APÊNDICE C

Desenho técnico da peça 3.

