

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

BRUNO CORDEIRO E SILVA

APLICAÇÃO DOS METAMATERIAIS ACÚSTICOS NA TRANSMISSÃO SONORA

GOIÂNIA - GO

2024



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): Bruno Cordeiro e Silva

Título do trabalho: Aplicação dos metamateriais acústicos na transmissão sonora

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[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(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) 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.

[2] **Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Marlize Garcia Fagundes Neto**, Professor do Magistério Superior, em 18/12/2024, às 09:45, 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 **Bruno Cordeiro E Silva**, Discente, em 19/12/2024, às 10:14, 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 **5050079** e o código CRC **95444A41**.

Referência: Processo nº 23070.044598/2024-04

SEI nº 5050079

BRUNO CORDEIRO E SILVA

APLICAÇÃO DOS METAMATERIAIS ACÚSTICOS NA TRANSMISSÃO SONORA

Monografia apresentada à Universidade Federal de Goiás (UFG), como exigência à conclusão da disciplina de Projeto Final de Curso e obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto (UFG)

GOIÂNIA - GO

2024

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

Silva, Bruno Cordeiro e
Aplicação dos metamateriais acústicos na transmissão sonora
[manuscrito] / Bruno Cordeiro e Silva. - 2024.
50 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto; co-orientador
Dr. Leonardo de Queiroz Moreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2024.

Bibliografia. Anexos.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de
figuras, lista de tabelas.

1. Metamateriais. 2. Silenciador Acústico. 3. Manufatura aditiva.
4. Simulação. 5. Tubo de impedância. I. Fagundes Neto, Marlipe Garcia,
orient. II. Título.

CDU 621



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

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dezoito dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e quatro iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Aplicação dos metamateriais acústicos na transmissão sonora”, de autoria de Bruno Cordeiro e Silva, do curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Eng. Marcos Vinicius Silva Rodrigues (BRG Geradores) e Prof. Dr. Sigeo Kitatani Junior (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,0 , tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marlipe Garcia Fagundes Neto**, **Professor do Magistério Superior**, em 18/12/2024, às 10:42, 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 Junior**, **Professor do Magistério Superior**, em 18/12/2024, às 10:44, 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 **Marcos Vinicius Silva Rodrigues**, **Usuário Externo**, em 18/12/2024, às 10:44, 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_a_cesso_externo=0, informando o código verificador **5050057** e o código CRC **10A7A767**.

BRUNO CORDEIRO E SILVA

APLICAÇÃO DOS METAMATERIAIS ACÚSTICOS NA TRANSMISSÃO SONORA

Monografia apresentada à Universidade Federal de Goiás (UFG), como exigência à conclusão da disciplina de Projeto Final de Curso e obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 18/12/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto – UFG
Orientador

Prof. Dr. Sigeo Kitatani Junior – UFG
Avaliador

Eng. Marcos Vinicius Silva Rodrigues – UFG
Avaliador

Dedico este trabalho, aos meus pais, Edvânio e Roseni que fizeram de tudo para eu pudesse estudar e entrar em uma boa universidade. Sem este sacrifício deles, nada disso teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

A vocês, meus pais, dedico este trabalho com todo amor e gratidão que existem em mim. Por todos os sacrifícios que fizeram, pelas incontáveis renúncias que encararam para que eu pudesse trilhar o caminho acadêmico, deixo aqui meu mais profundo reconhecimento. Vocês sempre foram o meu alicerce, meu porto seguro e minha inspiração. Se hoje conquisto este marco, é porque vocês acreditaram em mim mesmo quando eu duvidei. Pelas palavras de incentivo, pelos abraços nos momentos de fraqueza e pela força silenciosa que sempre emanaram, sou eternamente grato. Que este trabalho seja uma singela retribuição a todo o esforço, amor e dedicação que vocês colocaram em cada etapa da minha vida. Este sonho não é apenas meu; é nosso. Com todo o meu amor, obrigado por tudo.

Por fim agradeço ao Vitor, Gabriel, João, Luan, Rafael e Pedro Victor que com seu companheirismo e parceria durante toda a jornada acadêmica tornaram os momentos mais alegres e descontraídos.

“Quando você acha que as pessoas morrem? Quando elas levam um tiro de pistola bem no coração? Não. Quando são vencidas por uma doença incurável? Não. Quando bebem uma sopa de cogumelos venenosos? Não! Elas morrem... Quando são esquecidas.”

(Eiichiro Oda)

RESUMO

Metamateriais são estruturas projetadas para apresentar propriedades físicas inexistentes em materiais naturais, como a manipulação controlada de ondas sonoras, o que potencializa a mitigação acústica. Quando associada à manufatura aditiva, essa tecnologia abre novas possibilidades para o isolamento acústico. Este estudo tem como objetivo explorar o conceito e a aplicação do modelo de metamaterial acústico UOM (Ultra-open Metamaterial), proposto por Ghaffarivardavagh (2018), validando sua eficiência na perda de transmissão sonora com base em sua geometria. Além disso, o trabalho investiga as vantagens das simulações aplicadas a silenciadores acústicos, verificando sua precisão por meio de ensaios em tubo de impedância em conjunto com fabricação aditiva do silenciador. Os resultados obtidos indicam que os objetivos foram alcançados, dado o alinhamento entre os resultados analíticos, simulados e ensaiados, com margens de erro variando entre 0,4% e 8,0%. Os ensaios também demonstraram proximidade com as simulações, apresentando um erro de 3,5% nas frequências de maior perda de transmissão, apesar das diferenças nos valores absolutos de pico. Entretanto, a fabricação dos modelos físicos em impressão 3D com resina revelou fragilidades estruturais decorrentes das dimensões reduzidas, evidenciando desafios que precisam ser superados para melhorar a viabilidade prática.

Palavras-chave: Metamateriais; Silenciador acústico; Manufatura aditiva; Simulação; Tubo de impedância.

ABSTRACT

Metamaterials are structures designed to exhibit physical properties not found in natural materials, such as controlled manipulation of sound waves, enhancing acoustic mitigation. When combined with additive manufacturing, this technology offers new possibilities for acoustic insulation. This study aims to explore the concept and application of the acoustic metamaterial model UOM (Ultra-open Metamaterial) proposed by Ghaffarivardavagh (2018), validating its efficiency in sound transmission loss based on its geometry. Additionally, the research investigates the advantages of simulations applied to acoustic silencers, evaluating their accuracy through impedance tube tests in conjunction with additive manufacturing of the silencer. The results indicate that the study's objectives were achieved, showing alignment between analytical, simulated, and tested results, with error margins ranging from 0.4% to 8.0%. The tests also showed proximity to the simulations, with a 3.5% error in the frequencies of maximum transmission loss, despite differences in peak absolute values. However, the fabrication of physical models using 3D resin printing revealed structural weaknesses due to reduced dimensions, highlighting challenges to be addressed for improved practical feasibility.

Keywords: Metamaterials; Acoustic silencer; Additive manufacturing; Simulation; Impedance tube.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Silenciador reativo..... | 18 |
| Figura 2.2 – Silenciador composto dissipativo e reativo..... | 18 |
| Figura 2.3 – Classificação de materiais..... | 19 |
| Figura 2.4 – Esquema método de duas cargas..... | 21 |
| Figura 3.1 – Metamaterial de bicamada transversal..... | 25 |
| Figura 3.1 – Linha do tempo de trabalhos anteriores..... | 26 |
| Figura 4.1.1: Transmitância do metamaterial..... | 27 |
| Figura 4.1.2 – Parâmetros de geometria do silenciador..... | 29 |
| Figura 4.2.1 – Modelos dos metamateriais..... | 30 |
| Figura 4.2.2 – operação “combinar”..... | 31 |
| Figura 4.2.3 – modelo negativo dos metamateriais..... | 32 |
| Figura 4.2.4 – <i>Harmonic Acoustics analysis</i> | 32 |
| Figura 4.2.5 – Malha dos modelos de silenciadores..... | 33 |
| Figura 4.2.6 – Árvore de projeto simulação..... | 33 |
| Figura 4.3.1 – Aparato experimental para medição da perda de transmissão..... | 34 |
| Figura 4.3.2 – Esquema da posição dos microfones..... | 35 |
| Figura 4.3.3 – Metamaterial secundário..... | 36 |
| Figura 4.3.4 – Silenciadores fabricados..... | 36 |
| Gráfico 5.1.1 – Espessura x Ângulo..... | 37 |
| Gráfico 5.1.2 – Raio interno x Ângulo..... | 38 |
| Gráfico 5.1.3 – Espessura x Frequência..... | 38 |
| Gráfico 5.1.4 – Raio interno x Frequência..... | 39 |
| Gráfico 5.2.1.1 – PT simulação Silenciadores Primários..... | 40 |
| Gráfico 5.2.2.1 – Curva PT simulação do Silenciador Secundário..... | 41 |
| Gráfico 5.3.1 – Curvas de PT dos Silenciadores Secundários..... | 42 |
| Gráfico 5.3.2 – Curvas de PT ampliadas dos Silenciadores Secundários..... | 43 |
| Figura 6.1 – Defeitos da fabricação dos silenciadores..... | 45 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1.1 – Tabela de parâmetros geométricos e suas características | 28 |
| Tabela 4.2.1 – Dados geométricos silenciadores primários simulados | 31 |
| Tabela 5.2.1.1 – Valores de pico de perda de transmissão sonora..... | 40 |
| Tabela 5.2.1.2 – Comparativo comprimento de onda x espessura silenciador | 41 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----|---|
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| NR | Norma Regulamentadora |
| PT | Perda de Transmissão Sonora |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| UOM | <i>Ultra-open Metamaterial</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------|----------------------------|
| p | Pressão sonora |
| v | Velocidade linear |
| k | Número de onda |
| s | Distância entre microfones |
| ρ | Massa específica |
| H | função transferência |
| f | Frequência |
| n | Índice de refração |
| λ | Comprimento de onda |
| t | Espessura do silenciador |
| Z | Impedância |
| r | Raio |
| ϕ | Ângulo |
| c_0 | Velocidade do som |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1 | OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.2 | ESTRUTURAÇÃO | 15 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 17 |
| 2.1 | SILENCIADORES..... | 17 |
| 2.2 | METAMATERIAIS ACÚSTICOS..... | 18 |
| 2.3 | MÉTODOS DAS DUAS CARGAS | 20 |
| 2.4 | MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS | 23 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 25 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 27 |
| 4.1 | GEOMETRIA DO METAMATERIAL | 27 |
| 4.2 | SIMULAÇÃO..... | 30 |
| 4.3 | TUBO DE IMPEDÂNCIA..... | 34 |
| 5 | RESULTADOS | 37 |
| 5.1 | GEOMETRIA DO METAMATERIAL | 37 |
| 5.2 | SIMULAÇÃO..... | 39 |
| 5.2.1 | SILENCIADORES PRIMÁRIOS..... | 40 |
| 5.2.2 | SILENCIADOR SECUNDÁRIO | 41 |
| 5.3 | ENSAIOS TUBO DE IMPEDÂNCIA..... | 42 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 44 |
| | REFERÊNCIAS..... | 47 |
| | APÊNDICE A – Dados de geometria | 50 |

1 INTRODUÇÃO

A acústica, ramo da física que investiga o som e suas propriedades, destaca-se como uma área de crescente relevância na engenharia, especialmente na engenharia mecânica, onde técnicas avançadas de controle de ruído e vibrações são constantemente demandadas devido ao ruído de máquinas, cada vez mais presente do cotidiano das pessoas. O som, definido como uma onda mecânica que se propaga por meios materiais, é classificado como ruído quando suas características se tornam indesejáveis ou prejudiciais ao conforto e à saúde humana, portanto está intrinsecamente associada à capacidade de audição (PIERCE, 1989). Segundo Rossing (2002), o controle acústico abrange desde a mitigação de ruídos ambientais até a minimização de ruídos indesejadas em equipamentos industriais, visando maximizar a eficiência e a segurança operacional.

Existem três principais maneiras de controlar vibração e ruído sonoro: atuando na fonte, no meio de propagação da onda ou no receptor do ruído e vibração (LI et al., 2020). Devido à crescente demanda por produtos e máquinas mais complexas e funcionais, a fabricação de fontes sonoras com menores níveis de ruído e vibração se torna um desafio complexo. Além disso, a abordagem voltada para o receptor apresenta suas dificuldades, pois a locomoção e a troca frequente de ambientes a tornam inviável. Portanto, desenvolver um dispositivo que atue no meio de propagação não só se revela como a alternativa mais viável como é o mais aplicado.

Por sua vez, existem duas maneiras de controlar o ruído no meio de propagação, o controle de ruído passivo e o controle de ruído ativo. No passivo, utiliza-se de materiais isolantes para bloquear os sons do ambiente, absorvendo ou refletindo as ondas sonoras. Enquanto que no ativo utiliza-se de uma fonte de energia externa para cancelar o ruído, por meio da adição de uma fonte de ruído secundária em fase com a primária que cancela o ruído do ambiente (BIES; HANSEN, 2003).

Os materiais mais convencionais para o controle de ruído passivo, como espumas acústicas, lã de rocha e lã de vidro e filtros acústicos no geral são eficazes no condicionamento de ambientes em médias e altas frequências. No entanto, apresentam limitações significativas em relação à eficiência na absorção de baixas frequências. Nesse contexto, os metamateriais acústicos emergem como uma solução promissora, superando as restrições dos absorvedores acústicos convencionais. Eles

se destacam pela capacidade de atenuar ruídos de baixa frequência e por suas dimensões reduzidas (LI et al., 2020).

Metamateriais acústicos são materiais artificiais projetados para manipular ondas sonoras de maneira não convencional, com propriedades que não podem ser encontradas em materiais naturais (SILVA, 2016). Eles são criados através da combinação de estruturas ou unidades repetitivas, chamadas de "células unitárias", que interagem com as ondas acústicas de forma a alterar seu comportamento, como velocidade de propagação, refração e absorção. Entre as propriedades mais notáveis dos metamateriais acústicos estão a capacidade de criar materiais com índice de refração negativo ou de anular a propagação de ondas sonoras em determinadas frequências, fenômenos que podem ser explorados para diversas aplicações inovadoras. Essas estruturas possibilitam a manipulação controlada das ondas sonoras, potencializando a mitigação, que em conjunto com a manufatura aditiva, abre novas perspectivas para o isolamento acústico.

1.1 OBJETIVOS

O presente estudo visa explorar o conceito e a aplicação do modelo de metamaterial acústico proposto por Ghaffarivardavagh (2018), validando sua perda de transmissão sonora (PT) com base em sua geometria. Além disso o presente trabalho visa explorar as vantagens da simulação dentro do campo dos silenciadores acústicos e sua validação por meio de ensaios no tubo de impedância, explorando, também, as limitações da fabricação dos silenciadores por impressão 3D.

1.2 ESTRUTURAÇÃO

Este projeto final de curso é dividido nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1:** Introdução;

Apresentação geral sobre ruídos acústicos, formas de controle de ruído, metamateriais acústicos;

- **Capítulo 2:** Fundamentação teórica;

Apresentação dos conceitos necessários para o entendimento da metodologia e resultados do trabalho;

- **Capítulo 3:** Revisão bibliográfica;

Exposição de trabalhos que antecedem e fundamentam este trabalho;

- **Capítulo 4:** Metodologia;

Apresenta os métodos numéricos e experimentais utilizados para obtenção dos resultados;

- **Capítulo 5:** Resultados;

Apresentação e comparação das curvas de perda de transmissão obtidas numericamente e experimentalmente;

- **Capítulo 6:** Conclusão;

Apresentação e discussão das principais conclusões dos resultados obtidos, tendo uma visão crítica e objetiva da metodologia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda os conceitos relacionados aos silenciadores, aos metamateriais acústicos, ao método das duas cargas para a determinação da curva de perda de transmissão, bem como à validação do modelo e o método dos elementos finitos.

2.1 SILENCIADORES

O controle acústico é cada vez mais necessário atualmente no cotidiano, uma vez que o ruído está cada vez mais presente nas grandes cidades. Portanto, se torna um desafio para a engenharia condicionar os mais variados ruídos para um nível aceitável para o ouvido humano.

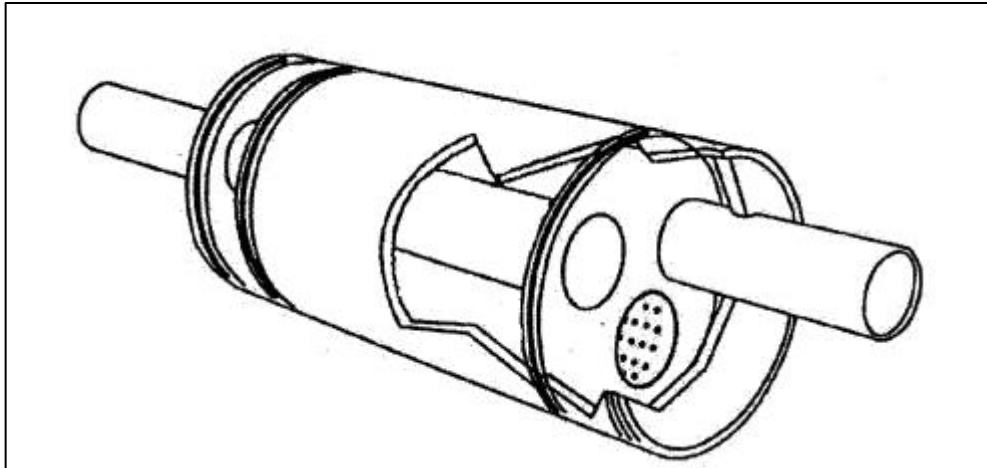
Segundo a NR 15 (Norma Regulamentadora 15), norma que diz respeito a atividades e operações insalubres, a tolerância para ruídos contínuos ou intermitentes não devem exceder 8 horas diárias para ruídos de 85 dB(A), ou podem prejudicar a audição de quem é exposto.

Dessa maneira, existem dois tipos de dispositivos para condicionamento de ruído de sistema de ventilação e exaustão: silenciadores ativos e passivos. O silenciador ativo emprega uma fonte de energia externa para atenuar o ruído, esses sistemas incorporam microfones e alto-falantes que detectam o ruído incidente e emitem um som em fase oposta, anulando o ruído indesejado por interferência destrutiva. Os silenciadores acústicos passivos atuam na redução de ruído por meio da mudança abrupta da impedância do meio de propagação da onda ou na absorção da energia sonora. Os silenciadores acústicos passivos se dividem em dois tipos baseados nos efeitos que possuem (BIES; HANSEN, 2003):

- Silenciadores dissipativos: utilizam materiais absorventes, como lã de vidro ou lã de rocha, que transformam a energia sonora em calor e vibração. Esses são eficazes principalmente em frequências médias e altas;
- Silenciadores reativos: são baseados em cavidades e câmaras (Fig. 2.1) que alteram a impedância acústica e refletem as ondas sonoras de volta à fonte, cancelando o som por interferência. São eficazes principalmente em baixas frequências.

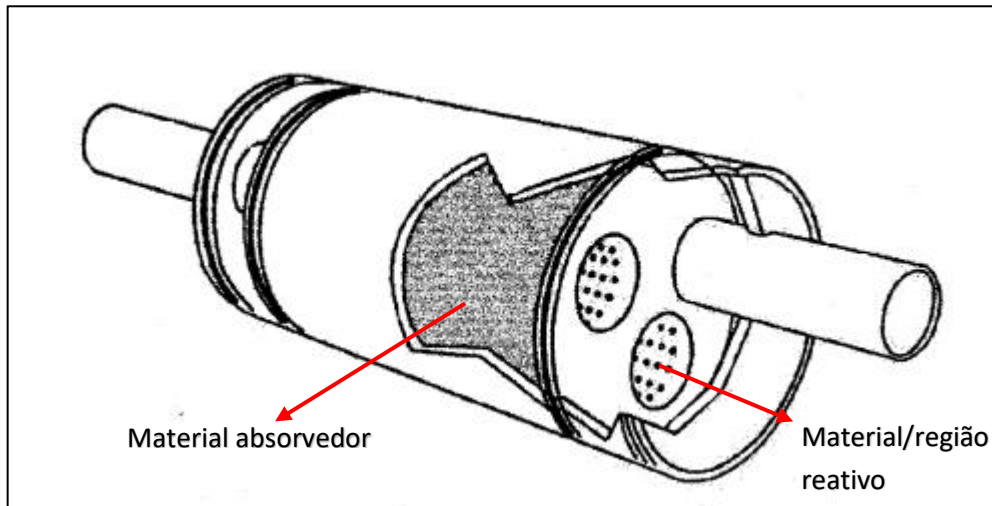
Além disso, podem existir silenciadores compostos, unindo as características dos silenciadores dissipativos (material absorvente) com a geometria dos silenciadores reativos, como ilustrado na Fig. 2.2.

Figura 2.1 – Silenciador reativo



Fonte: Lima (2008).

Figura 2.2 – Silenciador composto dissipativo e reativo



Fonte: Adaptado Lima (2008).

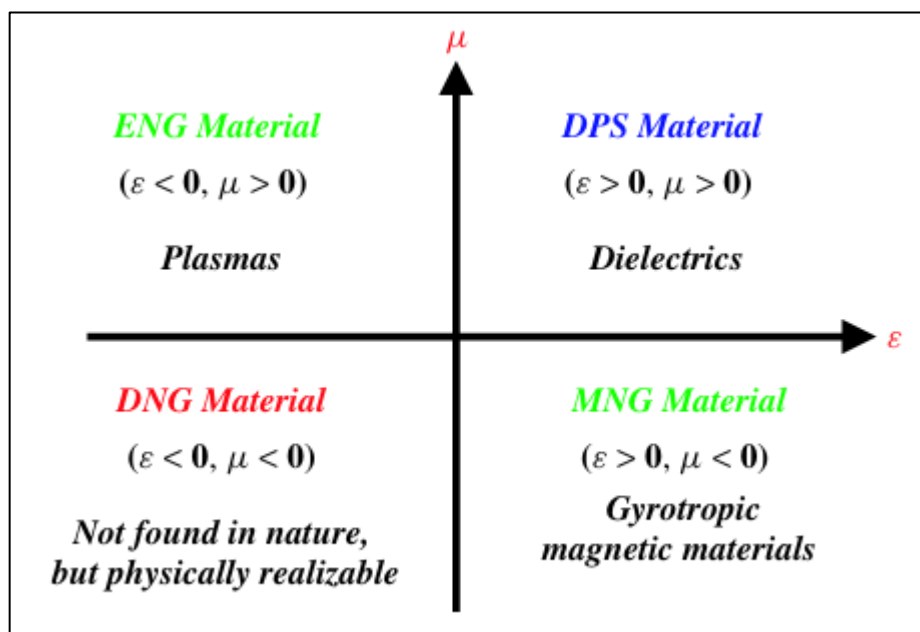
2.2 METAMATERIAIS ACÚSTICOS

No final do século XIX, houve os primeiros indícios de ideias de materiais artificiais com propriedades específicas. Em 1898, Jagadis Chunder Bose realizou o primeiro experimento com micro-ondas utilizando estruturas torcidas, hoje

classificadas como elementos quirais artificiais. Em 1914, Karl F. Lindman inseriu pequenas hélices de arame, orientadas aleatoriamente, em um meio, formando um meio quiral artificial. Mais tarde, em 1948, W. E. Kock fabricou lentes de micro-ondas ao dispor periodicamente esferas, discos e tiras condutoras, ajustando de modo eficaz o índice de refração dos meios artificiais (ENGHETA; ZIOLKOWSKI, 2006).

Porém, somente na segunda metade do século XX, as primeiras ideias e concepção sobre metamateriais (ou material canhoto, “*left-handed*”) foram reveladas pelo físico russo Veselago (1967), em um trabalho no qual postulava uma teoria que viabilizava a existência de materiais cujas propriedades de permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) fossem negativas simultaneamente, e, conseqüentemente, índice de refração (η) também negativo. Porém, o estudo desses tipos de materiais só foi ter seqüência de maneira significativa somente no trabalho de Pendry *et al.* (1999), onde foi proposto materiais com propriedades efetivas negativas de permissividade elétrica (ϵ_{eff}) e permeabilidade magnética (μ_{eff}), provando de maneira experimental somente do trabalho de Shelby *et al.* (2001) o índice de refração efetivo negativo (η_{eff}) (SILVA, 2016). Essas propriedades estão representadas na Fig. 2.3, onde os materiais são classificados conforme os valores positivos ou negativos de suas propriedades efetivas, dentro do campo de estudo do eletromagnetismo.

Figura 2.3 – Classificação de materiais



Fonte: Engheta; Ziolkowski (2006).

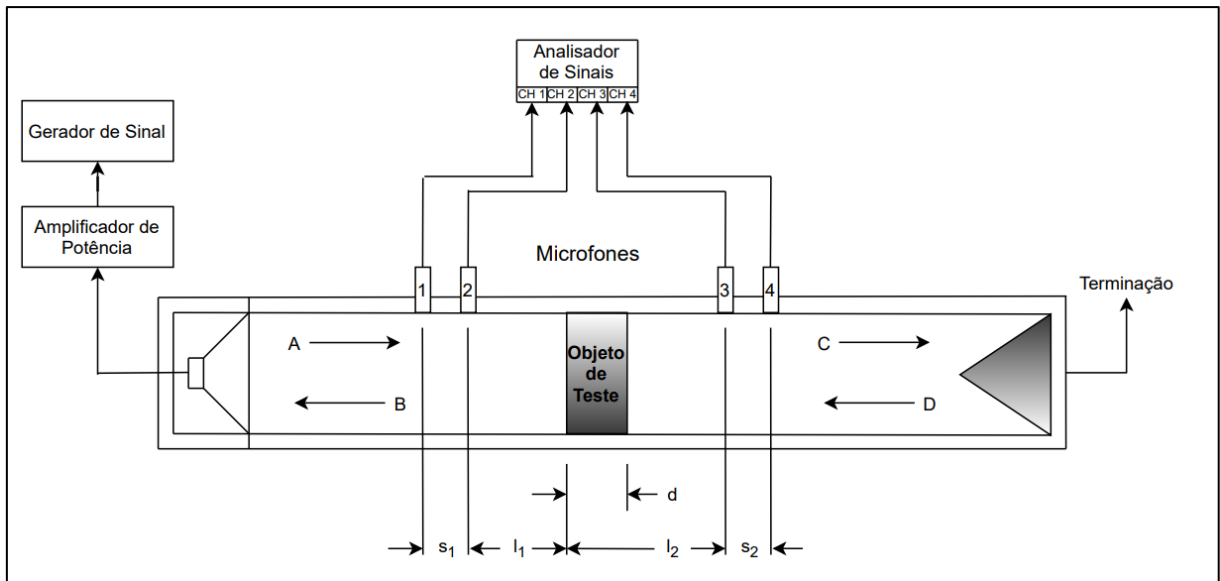
Com base nisso, apesar de não haver um consenso sobre a definição de metamateriais, pode-se concluir que são materiais fabricados artificialmente dispostos periodicamente, de maneira que dependendo de sua geometria possuem propriedades efetivas negativas em determinadas frequências, possuindo características físicas não vistas em nenhum outro material na natureza.

Desta maneira, metamaterial acústico é um tipo de material artificialmente estruturado projetado para manipular e controlar ondas sonoras de maneiras que não são possíveis com materiais naturais. Esse tipo de material possui dimensões menores do que o comprimento de onda do som que interage com ele, de maneira que possui densidade efetiva (ρ_{eff}), módulo volumétrico efetivo (κ_{eff}) e conseqüentemente índice de refração efetivo (n_{eff}) simultaneamente negativos em certas faixas estreitas de frequência. Tal fenômeno é o que causa propriedades acústicas não convencionais, ou seja, não encontradas *in natura*, como a propagação de ondas acústicas de maneira reversa em relação à direção da energia transportada (onda de fase oposta).

2.3 MÉTODOS DAS DUAS CARGAS

O propósito central desse método é determinar a perda de transmissão (PT) de um filtro acústico sob a incidência de ondas normais à superfície do objeto em teste. Para medir essas características pelo Método de Duas Cargas, são necessários dois tubos com seção transversal constante, uma fonte de som, dois microfones posicionados a montante e dois microfones posicionados a jusante do filtro, além de um sistema digital para análise de frequência, como ilustrado na Fig. 2.4:

Figura 2.4 – Esquema método de duas cargas



Fonte: ASTM (2017).

Nesse método, é necessário realizar duas medições: uma com a terminação anecoica e outra com a terminação reflexiva, garantindo que ambas apresentem diferentes impedâncias. Isso possibilita o equacionamento da matriz transferência para obtenção do quadripolo A, B, C e D entre os pontos 1-2, 3-4, para as diferentes configurações que serão denotadas por a e b (TAO; SEYBERT, 2003).

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix}_a = \begin{bmatrix} A_{12} & B_{12} \\ C_{12} & D_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix}_a \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} p_3 \\ v_3 \end{bmatrix}_a = \begin{bmatrix} A_{34} & B_{34} \\ C_{34} & D_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_4 \\ v_4 \end{bmatrix}_a \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix}_b = \begin{bmatrix} A_{12} & B_{12} \\ C_{12} & D_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix}_b \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} p_3 \\ v_3 \end{bmatrix}_b = \begin{bmatrix} A_{34} & B_{34} \\ C_{34} & D_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_4 \\ v_4 \end{bmatrix}_b \quad (2.4)$$

Onde:

$$\begin{bmatrix} A_{12} & B_{12} \\ C_{12} & D_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(ks_1) & i\rho c \cdot \text{sen}(ks_1) \\ \frac{i \cdot \text{sen}(ks_1)}{\rho c} & \cos(ks_1) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} A_{34} & B_{34} \\ C_{34} & D_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(ks_2) & ipc \cdot \text{sen}(ks_2) \\ \frac{i \cdot \text{sen}(ks_2)}{\rho c} & \cos(ks_2) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Sendo k o número de onda.

A matriz referente aos elementos 2-3 e 3-2, na qual o silenciador está entre, para configuração a e b está denotada nas Eqs. 2.7 e 2.8:

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix}_a = \begin{bmatrix} A_{23} & B_{23} \\ C_{23} & D_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ v_3 \end{bmatrix}_a \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} p_3 \\ v_3 \end{bmatrix}_b = \begin{bmatrix} A_{23} & -B_{23} \\ -C_{23} & D_{23} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix}_b = \frac{1}{\Delta_{23}} \begin{bmatrix} D_{23} & B_{23} \\ C_{23} & A_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix}_b \quad (2.8)$$

Onde $\Delta_{23} = A_{23}D_{23} - B_{23}C_{23}$.

Ao isolar os termos de velocidades nas Eqs. 2.2 e 2.7 e substituí-los na Eq.2.7 para configuração a e de maneira análoga as Eqs. 2.3, 2.4 e 2.8 para configuração b , (uma vez que os microfones captam apenas informações relacionadas à pressão sonora) obtém-se:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ B_{12} \end{bmatrix} \begin{matrix} p_2 \\ (p_1 - A_{12}p_2) \end{matrix} \Big|_a = \begin{bmatrix} A_{23} & B_{23} \\ C_{23} & D_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{34} \\ B_{34} \end{bmatrix} p_3 + \left(C_{34} - \frac{D_{34}A_{34}}{B_{34}} \right) p_4 \Big|_a \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} -1 \\ B_{12} \end{bmatrix} \begin{matrix} p_3 \\ (\Delta_{34}p_4 - D_{34}p_4) \end{matrix} \Big|_b = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} D_{23} & B_{23} \\ C_{23} & A_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{12} \\ \Delta_{12} \end{bmatrix} \begin{matrix} p_2 \\ (p_1 - \frac{A_{12}D_{12}}{\Delta_{12}}p_1 - \frac{A_{12}}{B_{12}}p_2) \end{matrix} \Big|_b \quad (2.10)$$

Onde $\Delta_{12} = A_{12}D_{12} - B_{12}C_{12}$ e $\Delta_{34} = A_{34}D_{34} - B_{34}C_{34}$.

Portanto, por meio das Eqs. 2.9 e 2.10 é possível obter os parâmetros do quadripolo:

$$A_{23} = \frac{\Delta_{34}(H_{32a}H_{34b} - H_{32b}H_{34a}) + D_{34}(H_{32b} - H_{32a})}{\Delta_{34}(H_{34b} - H_{34a})} \quad (2.11)$$

$$B_{23} = \frac{B_{34}(H_{32a} - H_{32b})}{\Delta_{34}(H_{34b} - H_{34a})} \quad (2.12)$$

$$C_{23} = \frac{(H_{31a} - A_{12}H_{32a})(\Delta_{34}H_{34b} - D_{34}) - (H_{31b} - A_{12}H_{32b})(\Delta_{34}H_{34a} - D_{34})}{B_{12}\Delta_{34}(H_{34b} - H_{34a})} \quad (2.13)$$

$$D_{23} = \frac{(H_{31a} - H_{31b}) + A_{12}(H_{32b} - H_{32a})}{B_{12}\Delta_{34}(H_{34b} - H_{34a})} B_{34} \quad (2.14)$$

A função transferência $H_{ij}(f)$ para as configurações a e b é dada por:

$$H_{ij} = \frac{G_{ij}(f)}{G_{ii}(f)} \quad (2.15)$$

Onde $G_{ij}(f)$ é o espectro cruzado medido entre os microfones nas posições i e j , e $G_{ii}(f)$ é o auto-espectro medido pelo microfone na posição i .

Enfim, a perda de transmissão é dada pela Eq. 2.16:

$$PT = 20 \log \left(\frac{1}{2} \left| A_{23} + \frac{B_{23}}{\rho c} + \rho c C_{23} + D_{23} \right| \right) + 10 \log \left(\frac{A_{inc}}{A_{sai}} \right) \quad (2.16)$$

Onde A_{inc} é a área de entrada da onda incidente e A_{sai} é a área de saída da onda transmitida.

2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta muito utilizada na resolução de problemas complexos em engenharia e física, principalmente quando envolve análise estrutural e transferência de calor por condução. Sua origem remonta à década de 1940, quando foi desenvolvido inicialmente para a análise estrutural de aeronaves utilizando o trabalho de Richard Courant de 1943. Desde então, o método evoluiu significativamente, consolidando-se como um recurso fundamental na análise numérica de sistemas regidos por equações diferenciais parciais.

A formulação do MEF está alicerçada no conceito de subdivisão do domínio de interesse em pequenos elementos interconectados por nós. Segundo Cook et al. (2001), o comportamento do sistema é aproximado através de funções interpolares associadas a cada elemento, que, quando combinadas, formam uma representação global do problema. Essa abordagem possibilita a transformação de equações diferenciais parciais em sistemas de equações algébricas, viabilizando sua solução por métodos computacionais.

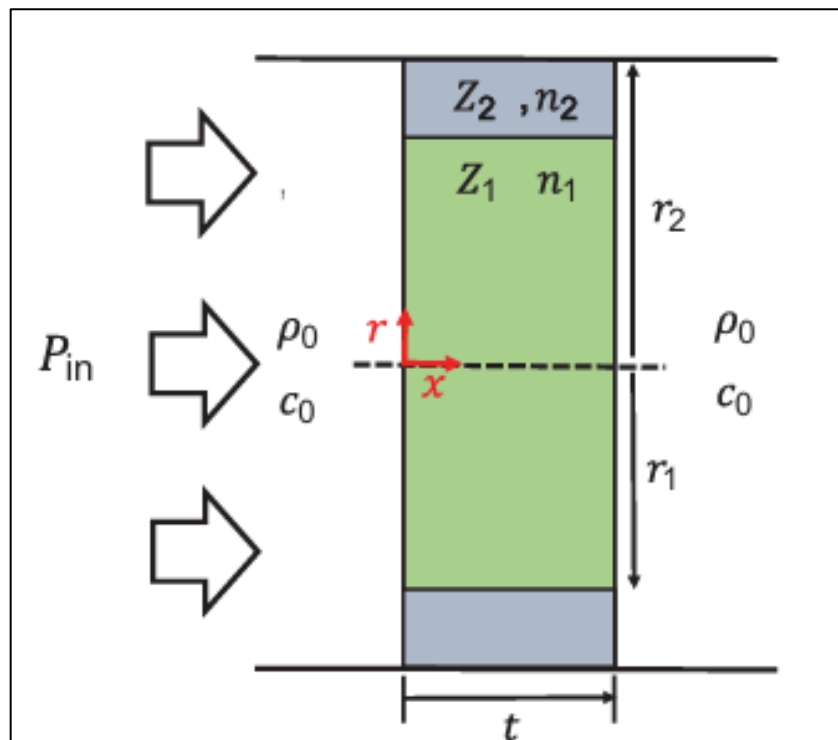
Na engenharia mecânica, o MEF é amplamente aplicado em análises estruturais, térmicas e acústicas. Em acústica, por exemplo, o método é utilizado para estudar a propagação de ondas e o desempenho de dispositivos como silenciadores e metamateriais acústicos (BIES; HANSEN, 2003). Essas aplicações evidenciam a versatilidade do MEF, que permite otimizar projetos e prever comportamentos em situações onde abordagens experimentais são inviáveis ou economicamente proibitivas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata sobre obras de outros autores que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ghaffarivardavagh (2018) propõe em seu trabalho a construção de um metamaterial acústico, de ação majoritariamente reativa, capaz de realizar a atenuação de ruído de forma que sua dimensão é menor que o comprimento de onda e ainda permite um grande fluxo de passagem de ar. Ele pontua que já havia metamateriais que permitiam a passagem de ar, porém era escasso algum que permitia uma passagem de ar para aplicações de ventilação forçada e ventiladores de resfriamento. Dessa forma, o autor desenvolve o que ele nomeou de *Ultra-open Metamaterial* (UOM), um metamaterial cuja célula unitária é menor que o comprimento de onda incidente e possui uma área aberta para passagem de ar predominante.

Figura 3.1 – Metamaterial de bicamada transversal



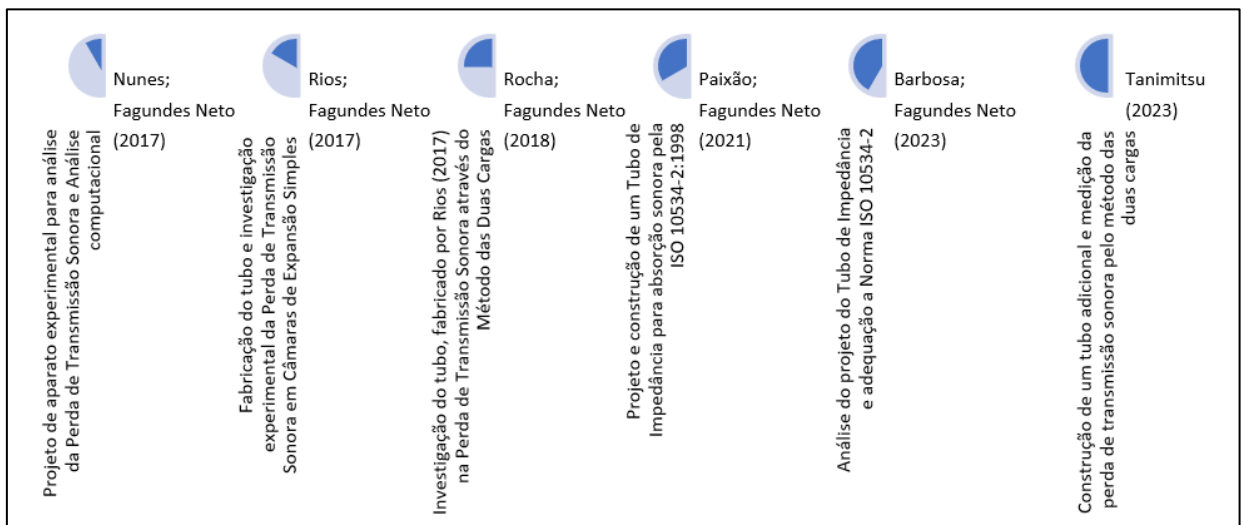
Fonte: Adaptado Ghaffarivardavagh (2018)

O presente trabalho visa analisar os efeitos que a mudança de geometria do metamaterial proposto por Ghaffarivardavagh causa na perda de transmissão sonora. Para tanto foi analisado a modelação geométrica analítica proposta no trabalho, de tal

forma que ainda foi desenvolvido uma análise por MEF para validação do silenciador e ensaios em um tubo de impedância.

Diversos trabalhos foram fundamentais para o desenvolvimento da bancada de ensaios acústicos, destacando-se, em especial, as contribuições de Nunes (2017), que projetou um tubo de impedância inicial, Rios (2017), que propôs melhorias significativas nesse projeto, e Rocha (2018), que otimizou o alinhamento dos tubos e aprimorou as terminações, sugerindo uma absorção sonora mais eficiente para uma das cargas. Posteriormente, Paixão (2021) construiu um novo tubo de impedância conforme as especificações da norma ISO 10534-2:1998, enquanto Barbosa (2023) revisou e refinou o projeto, assegurando o correto alinhamento e posicionamento dos tubos, microfones e cargas, com vistas à obtenção precisa da curva de absorção sonora. Por fim, Tanimitsu (2023) fabricou um tubo adicional dedicado à medição da perda de transmissão sonora. A sequência desses trabalhos é apresentada na linha do tempo ilustrada na Fig. 3.1.

Figura 3.1 – Linha do tempo de trabalhos anteriores



Fonte: próprio autor

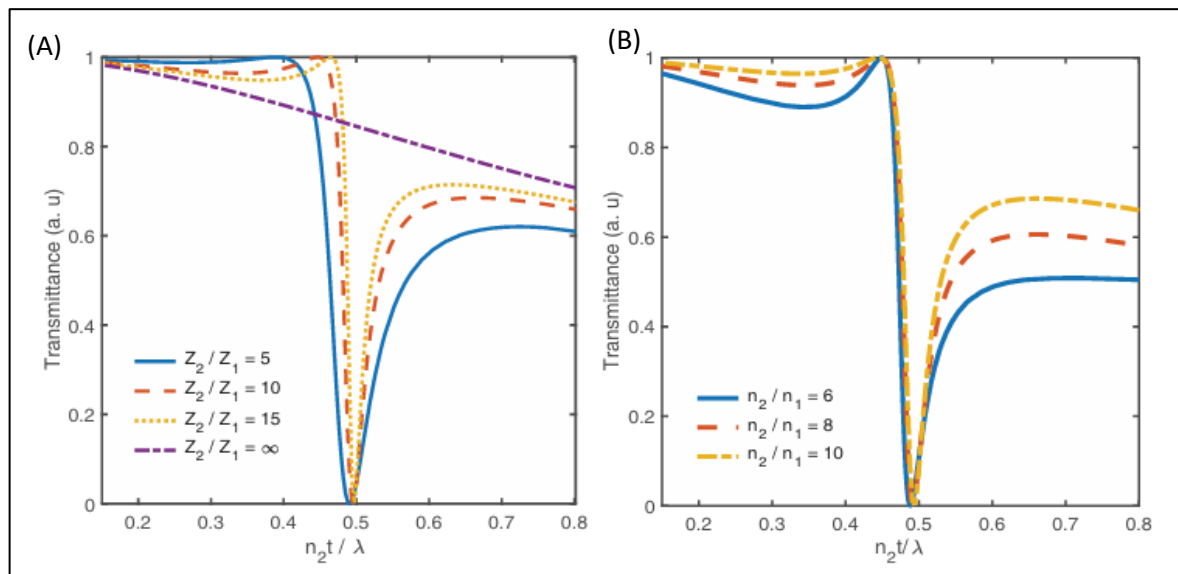
4 METODOLOGIA

Neste capítulo será explicitado a metodologia para modelação do metamaterial acústico, a abordagem para o método dos elementos finitos e o ensaio para determinação da perda de transmissão no tubo de impedância.

4.1 GEOMETRIA DO METAMATERIAL

No trabalho de Ghaffarivardavagh (2018) é colocado que a transmitância é uma função da adimensional $n_2 t / \lambda$. Os resultados gráficos são denotados na Fig. 4.1.1:

Figura 4.1.1: Transmitância do metamaterial



Fonte: Adaptado Ghaffarivardavagh (2018)

Na Fig 4.1.1(A) $n_2 / n_1 = 10$ é constante para toda variação de Z_2 / Z_1 , enquanto na Fig. 4.1.1(B) $Z_2 / Z_1 = 10$ é constante para toda variação de n_2 / n_1 .

Dessa forma, busca-se $n_2 t / \lambda = 0,5$ uma vez que é o valor da adimensional que possui o menor valor de transmitância.

Para definir parâmetros geométricos do silenciador, estabeleceu-se dados de entrada, dados constantes e os parâmetros de saída. Os dados de entradas foram o ângulo da hélice (ϕ), frequência a qual busca-se atenuar (f), e a razão de impedância (Z_2 / Z_1). Os parâmetros constantes foram o raio externo (r_2) limitado pelo raio do tubo de impedância no qual o silenciador deve se encaixar e o índice de refração do meio

“1” (n_1) que é o do ar. Para os parâmetros de saída tem-se o índice de refração do meio “2” (n_2), a espessura do silenciador (t) e o raio interno (r_1). A Tab. 4.1.1 ilustra os parâmetros e sua característica:

Tabela 4.1.1 – Tabela de parâmetros geométricos e suas características

| NATUREZA | PARÂMETRO | SÍMBOLO |
|-----------|---------------------------------|-----------|
| ENTRADA | Ângulo de hélice | ϕ |
| ENTRADA | Frequência que se busca atenuar | f |
| ENTRADA | Razão de impedância | Z_2/Z_1 |
| CONSTANTE | Raio externo | r_2 |
| CONSTANTE | Índice de refração do meio “1” | n_1 |
| SAÍDA | Índice de refração do meio “2” | n_2 |
| SAÍDA | Espessura do silenciador | t |
| SAÍDA | Raio interno | r_1 |

Fonte: Próprio autor

Definido o que é dado de entrada e o que é dado de saída, tem-se as seguintes equações, segundo de Ghaffarivardavagh (2018):

$$\frac{n_2 t}{\lambda} = 0,5 \rightarrow n_2 t = 0,5 \cdot \lambda \rightarrow n_2 t = 0,5 \frac{c_0}{f} \quad (4.1.1)$$

Para obtenção do índice de refração efetivo do meio “2” tem-se:

$$n_2 = 1 / \sin \phi \quad (4.1.2)$$

Dessa forma, combinando as Eqs. 4.1.1 e 4.1.2, resulta no valor da espessura do silenciador em função da velocidade do som (c_0), seno de ϕ e a frequência:

$$\frac{1}{\sin \phi} t = 0,5 \frac{c_0}{f} \rightarrow t = 0,5 \cdot \left(\frac{c_0 \sin \phi}{f} \right) \quad (4.1.3)$$

Tendo a estimado a espessura, define-se a razão de impedâncias segundo a Eq. 4.1.4:

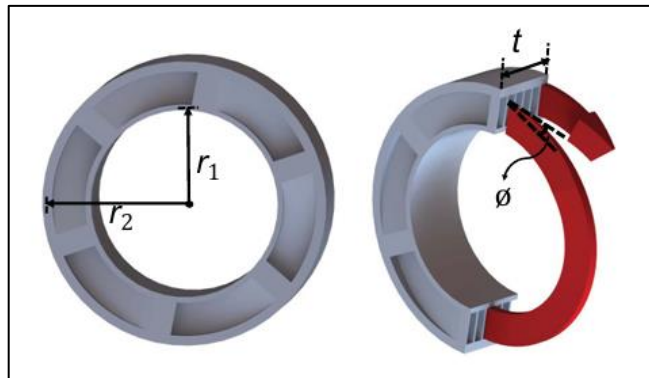
$$Z_2/Z_1 = \pi \cdot \frac{r_1^2}{t(r_2 - r_1)} \quad (4.1.4)$$

Estabelecido isso, manipulando a Eq. 4.1.4 e abreviando $Z_2/Z_1 = Z_r$, o valor do raio interno ficou:

$$r_1 = \left(-Z_r t \pm \sqrt{Z_r^2 t^2 + 4\pi Z_r t r_2} \right) / 2\pi, \quad 0 < r_1 < r_2 \quad (4.1.5)$$

Os parâmetros geométricos tratados são ilustrados em um modelo arbitrário do silenciador na Fig. 4.1.2:

Figura 4.1.2 – Parâmetros de geometria do silenciador



Fonte: Adaptado Ghaffarivardavagh (2018)

É importante ressaltar que independentemente do valor dos parâmetros mencionados, o número de espirais do silenciador é constante igual a 6, e conseqüentemente 6 espirais para passagem de ar.

Analisando a Fig. 4.1.1, optou-se por $Z_2/Z_1 = 5,0$, uma vez que a concavidade da curva cuja razão é igual a 5 é mais ampla, portanto, oferece a possibilidade de uma maior margem de variação do valor de $n_2 t / \lambda = 0,5$.

Tendo isso em mente, aplicando os valores de $c_0 = 343 \text{ m/s}$, $Z_r = 5,0$, $n_1 \approx 1,0$, $r_2 = 15,0 \text{ mm}$ tem-se a partir das Eqs. 4.1.3 e 4.1.5:

$$t = 0,5 \cdot \left(\frac{c_0 \sin \phi}{f} \right) = 171,5 \left(\frac{\sin \phi}{f} \right) \quad (4.1.6)$$

$$r_1 = \frac{(-Z_r t \pm \sqrt{Z_r^2 t^2 + 4\pi Z_r t r_2})}{2\pi}, 0 < r_1 < r_2$$

$$r_1 = \frac{-5t \pm \sqrt{25t^2 + 300\pi t}}{2\pi}$$

$$r_1 = \frac{-5t \pm 5\sqrt{t^2 + 12\pi t}}{2\pi}$$

$$r_1 = \frac{5}{2\pi} \left(-t \pm \sqrt{t^2 + 12\pi t} \right), 0 < r_1 < 15,0 \quad (4.1.7)$$

Desta forma, os resultados analíticos serão apresentados com base na variação da frequência (f) de 300 Hz a 1000 Hz ao passo de 100 Hz, e na variação do ângulo (ϕ) de 10° a 90° ao passo de 10°, observando a resposta da espessura (t) e raio interno (r_1). Esta análise foi feita com o auxílio do software *Excel*® para o controle de dados e construção de gráficos.

4.2 SIMULAÇÃO

Uma vez definido a geometria do silenciador acústico, foi realizada a modelagem 3D pelo *Inventor 2024* de três metamateriais, como na Fig. 4.2.1(A), 4.2.1(B) e 4.2.1(C), modeladas de tal forma que a frequências as quais devem atenuar a priori são 300 Hz, 500 Hz e 800 Hz consecutivamente:

Figura 4.2.1 – Modelos dos metamateriais



Fonte: Próprio autor

Seus parâmetros geométricos variáveis são:

Tabela 4.2.1 – Dados geométricos silenciadores primários simulados

| Modelo: | A | B | C |
|------------------------|---------|---------|---------|
| Raio interno (r_1) | 13,8 mm | 13,2 mm | 12,4 mm |
| Espessura (t) | 99,3 mm | 59,6 mm | 42,5 mm |

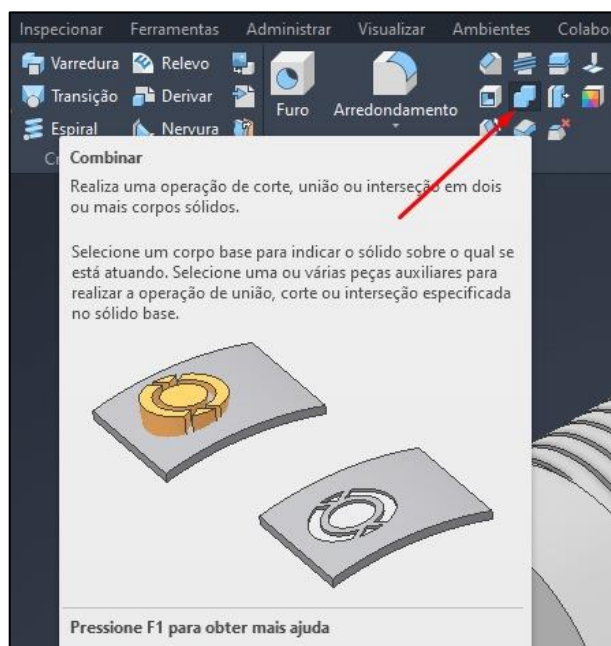
Fonte: próprio autor

Estes três Silenciadores foram determinados como Silenciadores Primários.

Concluída a modelagem, tornou-se necessário determinar a região do silenciador correspondente ao espaço ocupado pelo ar, ou seja, o volume que representa o “negativo” do silenciador dentro de um domínio previamente delimitado. Esse domínio foi definido como um cilindro com 30 mm de diâmetro, correspondente ao diâmetro do tubo de impedância, e com comprimento excedendo em 20 mm o comprimento total do silenciador.

A obtenção dessa região foi realizada por meio da operação de “combinação” no software *Inventor®*, que uniu o corpo do metamaterial ao cilindro. Esse processo permitiu identificar o volume de ar que preenche o metamaterial, conforme ilustrado na Fig. 4.2.2:

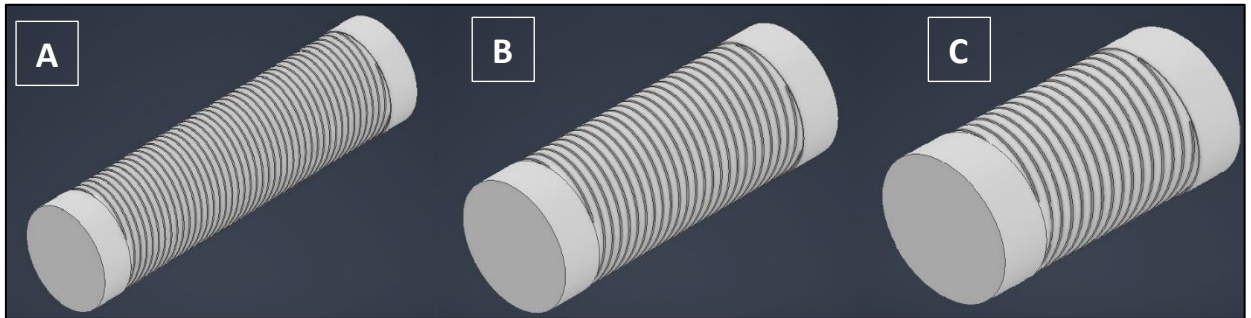
Figura 4.2.2 – operação “combinar”



Fonte: próprio autor

Como resultado desta operação obteve-se os seguintes modelos finais, conforme a Fig. 4.2.3:

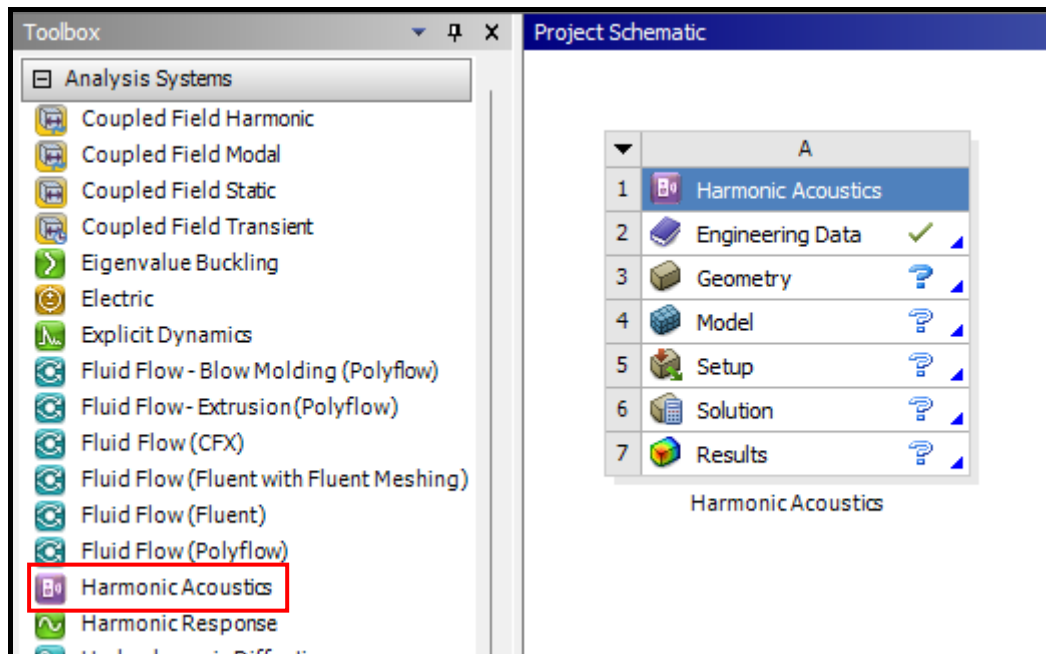
Figura 4.2.3 – modelo negativo dos metamateriais



Fonte: próprio autor

Com estes corpos, foi possível simular a perda de transmissão sonora utilizando o software *Ansys 2024 R1*. Para tanto, foi selecionado o sistema de análise *Harmonic Acoustics*, conforme a Fig. 4.2.4:

Figura 4.2.4 – *Harmonic Acoustics analysis*

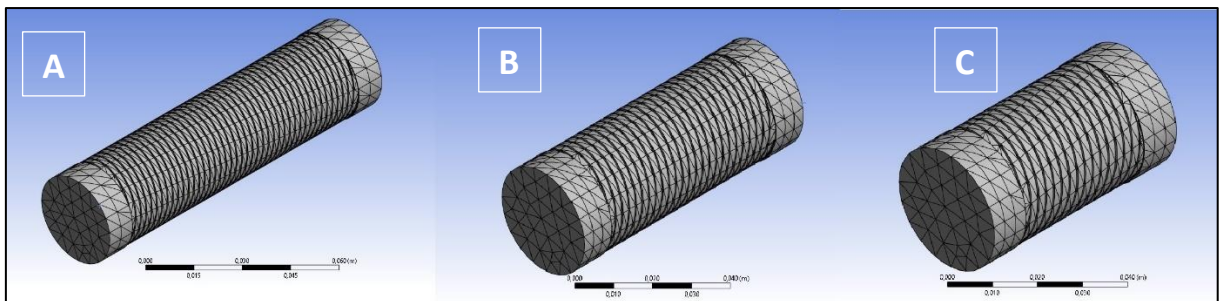


Fonte: próprio autor

Em seguida as geometrias feitas no *Inventor®* foram exportadas para o *Ansys®* utilizando a plataforma do próprio software, *SpaceClaim*, e o material definido como ar.

Para a geração da malha, Howard (2015) recomenda que o tamanho de cada elemento da malha seja pelo menos dez vezes menor do que o menor comprimento de onda que se deseja atenuar. Entretanto, considerando que este estudo aborda metamateriais acústicos cujas dimensões gerais são significativamente inferiores ao comprimento de onda, a malha foi configurada utilizando as ferramentas *Face Meshing* e *Size* e o tamanho de cada elemento foi definido como 5,0 mm, garantindo que o limite de nós permitido pela versão estudantil do *Ansys®* não fosse excedido e que os custos computacionais permanecessem controlados.

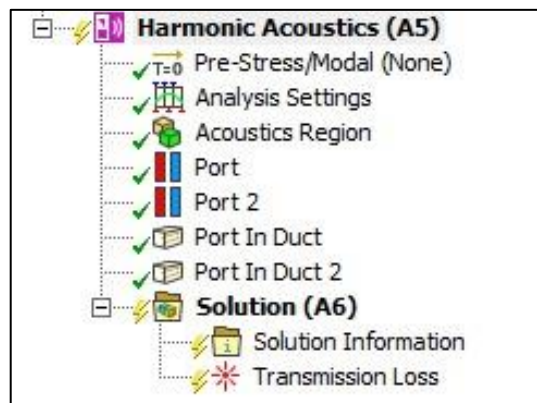
Figura 4.2.5 – Malha dos modelos de silenciadores



Fonte: próprio autor

A abordagem de análise utilizada foi o método *Port in Duct*, portanto foi definido uma *Port* de entrada e uma *Port* de saída, que são as superfícies por onde a pressão sonora de $1,0 Pa$ irá entrar e sair. Foi considerado também a velocidade do som a $20^{\circ}C$ de $343 m/s$. A árvore de projeto ficou:

Figura 4.2.6 – Árvore de projeto simulação



Fonte: próprio autor

A solução foi definida como *Transmission Loss* (Perda de Transmissão) e a faixa de frequência varrida foi definida entre 0 Hz e 2000 Hz no passo de 2 Hz, portanto, 1000 pontos.

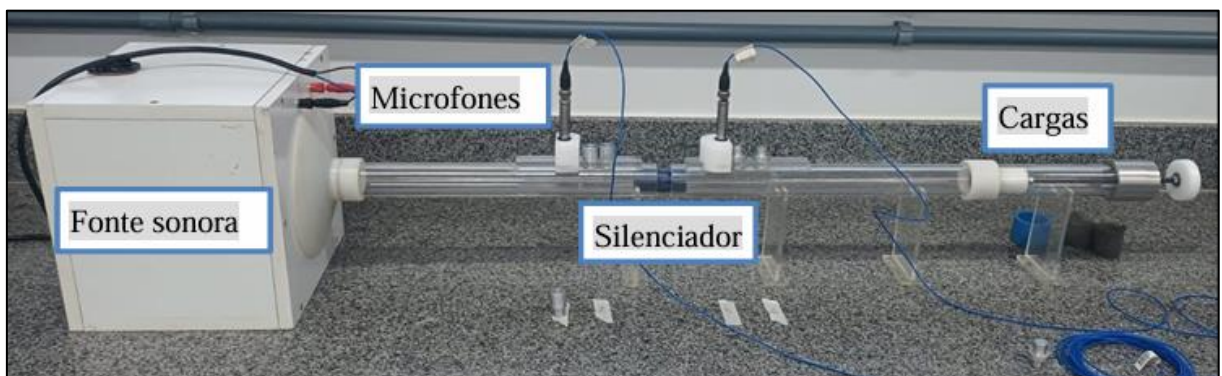
Estes três silenciadores foram construídos e simulados virtualmente com o objetivo de validar a modelagem proposta por Ghaffarivardavagh (2018). Para comprovar a veracidade das simulações e evidenciar suas vantagens em relação à ausência de uma solução analítica, será realizado um ensaio no tubo de impedância com outros silenciadores (Silenciadores Secundários), os quais foram simulados de maneira análoga aos três modelos previamente apresentados, porém aumentando a faixa de frequência para 0 – 6000 Hz. Essa abordagem decorre de limitações relacionadas à produção e aos ensaios experimentais com os modelos estabelecidos anteriormente, que serão detalhadas em seções subsequentes.

4.3 TUBO DE IMPEDÂNCIA

A fim de se validar a simulação e conseqüentemente o conceito da modelagem do metamaterial, uma bancada experimental foi montada conforme Tanimitsu (2023) e seguindo a ISO 10534-2, com o tubo tendo 30 mm de diâmetro.

No experimento, foram utilizadas duas cargas distintas: uma carga reflexiva feita de tarugo de cobre (25 mm de espessura) e outra carga absorvente composta de espuma Sonex (35 mm de espessura). Essas cargas foram escolhidas para representar diferentes condições de terminação/carga, sendo reflexão e absorção.

Figura 4.3.1 – Aparato experimental para medição da perda de transmissão



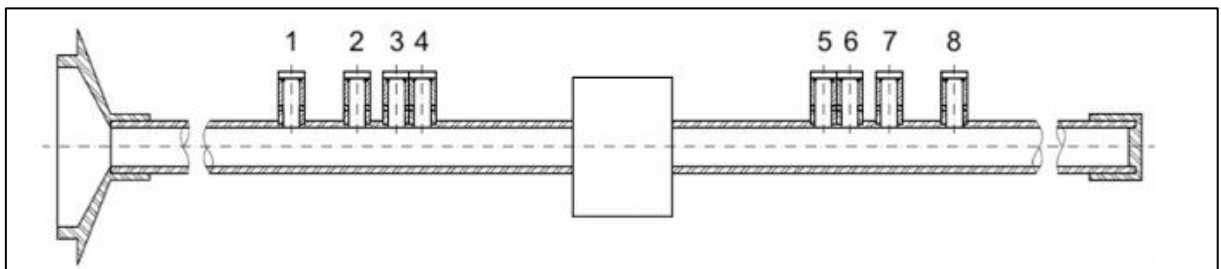
Fonte: próprio autor

Os demais aparatos experimentais foram:

- Gerador de sinais Brüel & Kjaer Power Amplifier Ttype 2734;
- Amplificador de sinais Leacs CA500;
- Placa de aquisição National Instruments NI USB – 9162
- Dois microfones PCB 377A21;
- Microcomputador

Como demonstrado na modelagem matemática para aquisição da perda de transmissão pelo método das duas cargas, seria necessários 4 microfones, porém como ilustrado na Fig. 4.3.1 há apenas dois microfones. Dessa forma, uma solução para contornar esta problemática foi manter um microfone de referência na posição 3 e fazer três medições variando a posição do segundo microfone e no fim uni-los utilizando um código no *Matlab*®. Cada par de aquisição de dados foi feita uma média de 30 medições. A posição dos microfones é representada pela Fig. 4.3.2:

Figura 4.3.2 – Esquema da posição dos microfones



Fonte: Rocha (2018)

O segundo microfone variou nas posições 1, 5 e 8 de acordo com a Fig. 4.3.2.

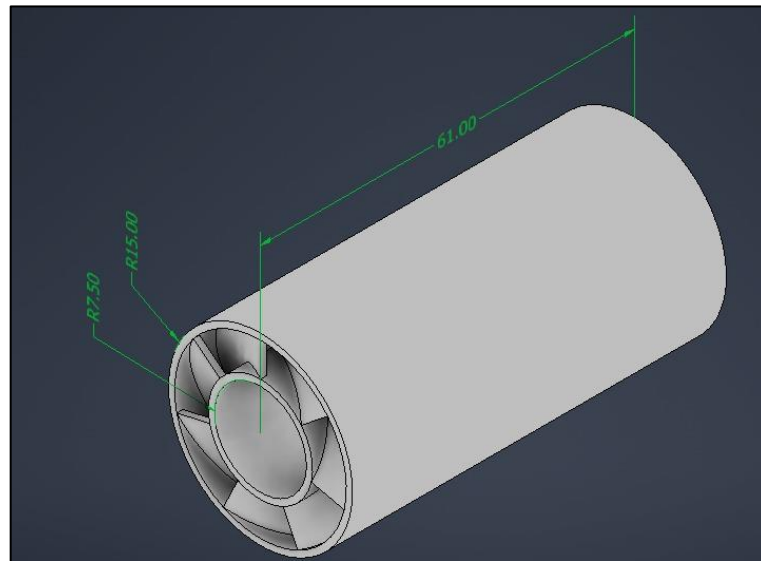
O intervalo de frequência da aquisição de dados foi de 0 – 6400Hz e a sensibilidade de ambos microfones foi de $48,0mV/Pa$ conforme o estabelecido pelo fabricante.

Os dados obtidos foram salvos em arquivo texto e posteriormente convertido em planilhas no software *Excel*® para interpretação e tratamento de dados.

Os silenciadores que foram ensaiados neste tubo de impedância foram os Silenciadores Secundários. Estes silenciadores possuem geometrias idênticas entre si, diferenciando-se exclusivamente pelo acabamento superficial, o qual foi variado durante o processo de fabricação por impressão 3D utilizando o software *Ultimaker*

Cura. Nesse processo, ajustou-se o parâmetro de qualidade superficial denominado *Fuzzy Skin Thickness*. Para fins de simulação, assumiu-se um acabamento superficial ideal. Cada modelo apresenta 61,0 mm de comprimento, 15,0 mm de raio externo, 7,5 mm de raio interno e sete espirais que realizam duas revoluções completas ao longo do corpo do silenciador, conforme ilustrado na Fig. 4.3.3:

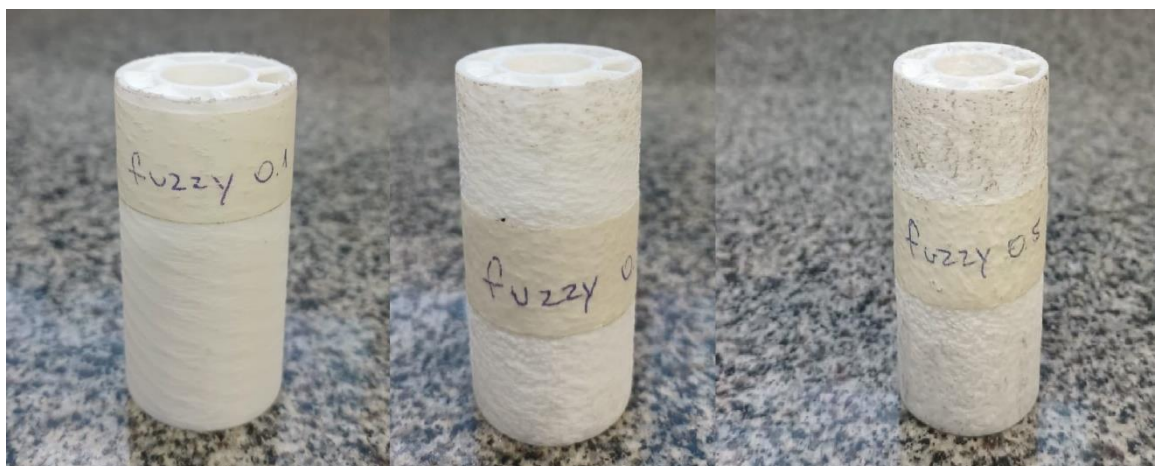
Figura 4.3.3 – Metamaterial secundário



Fonte: próprio autor

Fabricou-se 3 modelos, variando o parâmetro *Fuzzy Skin Thickness* em 0,1, 0,3 e 0,5. O acabamento superficial fica mais rugoso na medida que se aumenta este parâmetro. Dessa forma, os modelos a serem ensaiados ficaram:

Figura 4.3.4 – Silenciadores fabricados



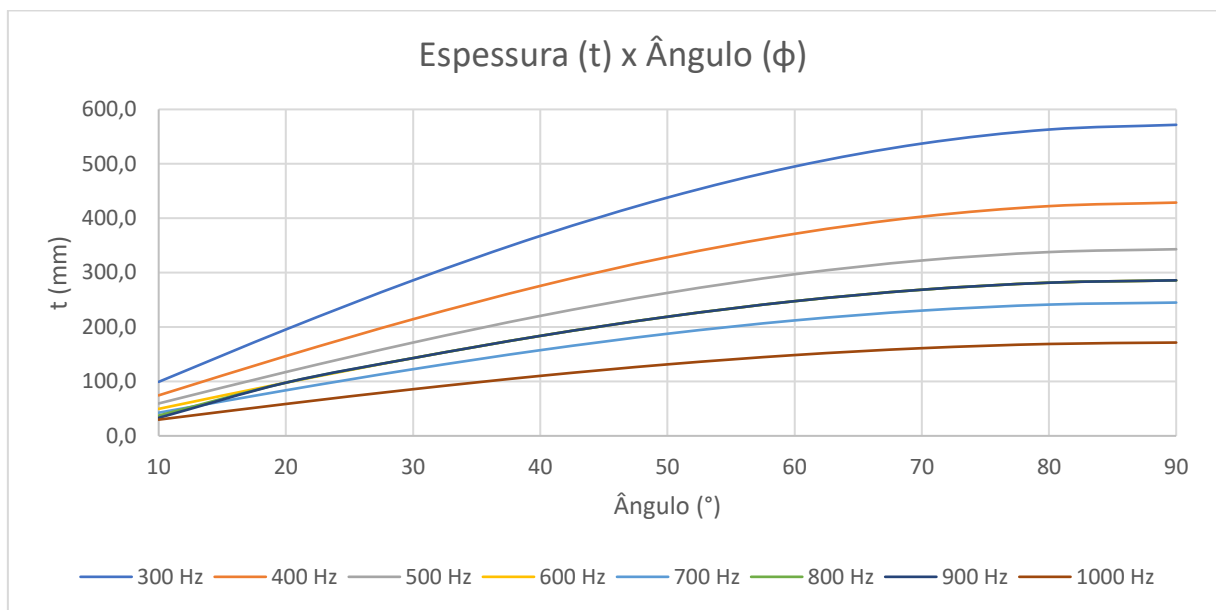
Fonte: próprio autor

5 RESULTADOS

Nesta seção os resultados relacionados à geometria, simulação e o ensaio serão apresentados.

5.1 GEOMETRIA DO METAMATERIAL

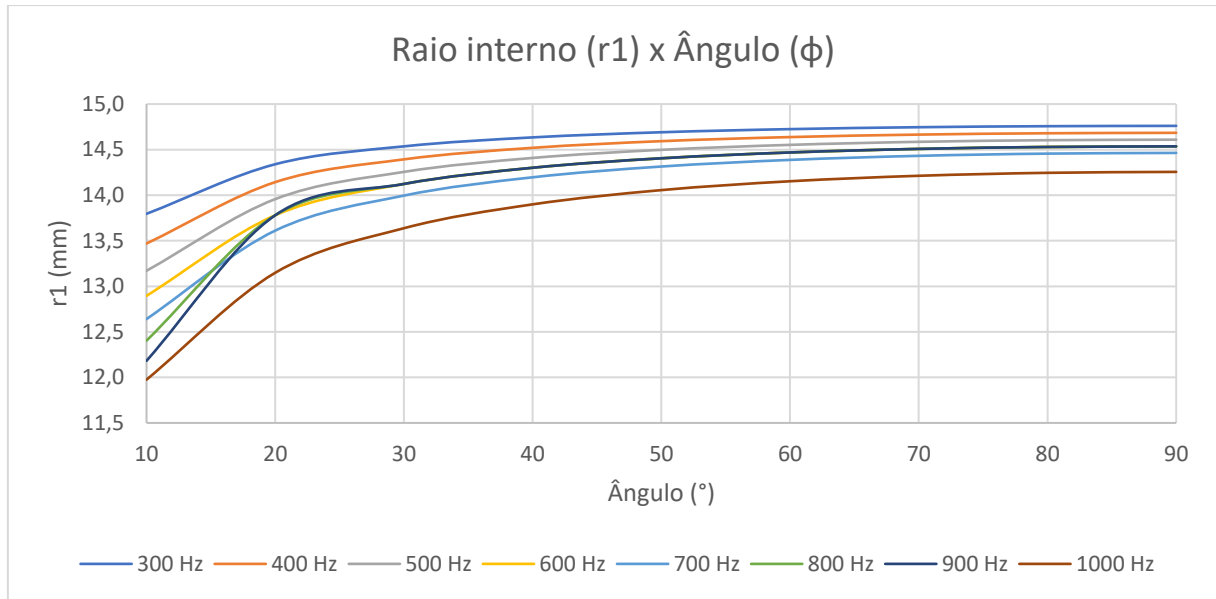
Gráfico 5.1.1 – Espessura x Ângulo



Fonte: próprio autor

O Gráfico 5.1.1 diz respeito à espessura do metamaterial em função da variação do ângulo. É possível observar que a espessura do metamaterial aumenta na medida que o ângulo também aumenta. Além disso, pode-se concluir que quanto menor a frequência a qual busca-se atenuar, maior a dimensão longitudinal do silenciador, apesar de que em baixos valores de ângulos, há uma tendência a um mesmo valor de espessura.

Gráfico 5.1.2 – Raio interno x Ângulo



O Gráfico 5.1.2 apresenta a variação do raio interno em função da variação do ângulo de hélice. Por meio dele conclui-se que na medida que o ângulo aumenta, o raio interno aumenta de forma que ainda é menor que $15,0\text{ mm}$, que é o valor do raio externo. Ademais é perceptível que a frequência e o raio interno são inversamente proporcionais, o que indica menor fluxo de passagem de ar na medida que se busca atenuar ruídos de maiores frequências.

Gráfico 5.1.3 – Espessura x Frequência

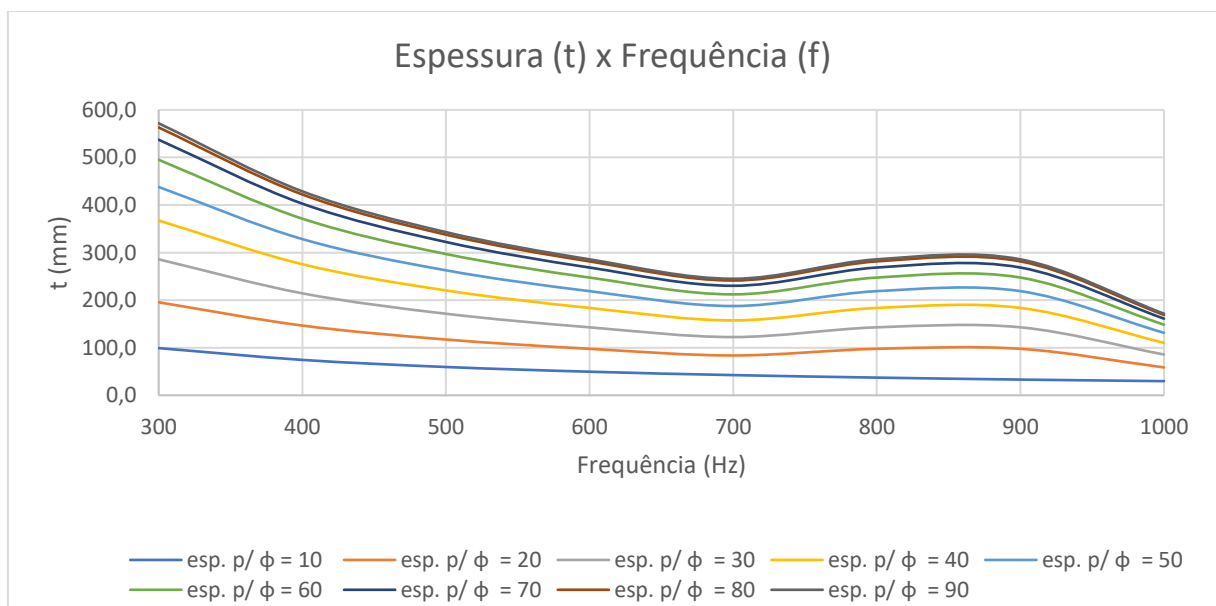
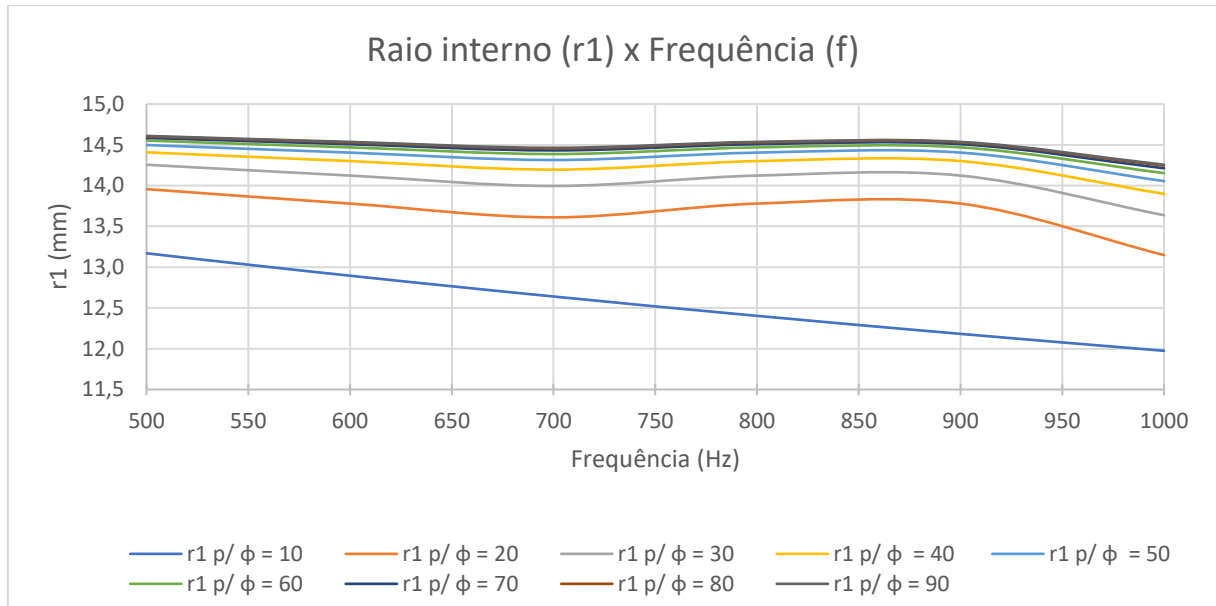


Gráfico 5.1.4 – Raio interno x Frequência



Fonte: próprio autor

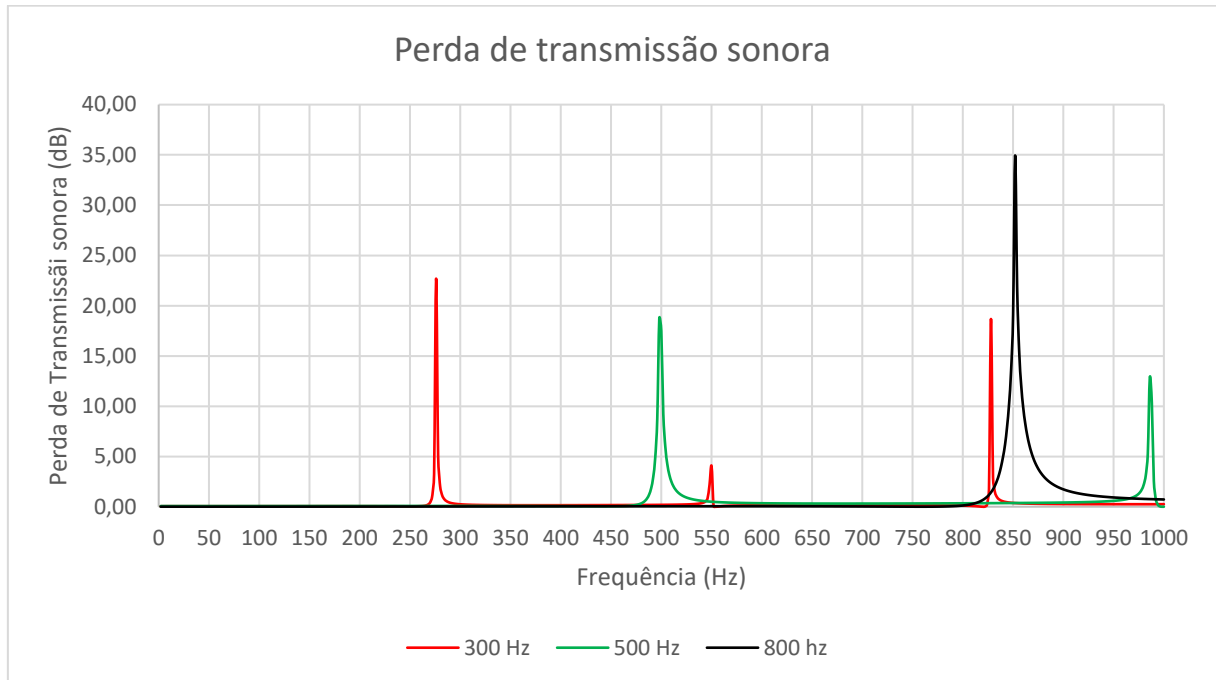
Observando os Gráficos 5.1.3 e 5.1.4 observa-se que aproximadamente em 850 Hz para ângulos acima de 10° há um desvio da tendência da espessura e raio interno em diminuir na medida que a frequência aumenta. Isso se deve ao fato de um mesmo silenciador poder atuar em diferentes frequências, que no caso deste modelo de silenciador ocorre geralmente no intervalo entre 800 – 900 Hz. Na Tabela presente no Apêndice A é possível observar melhor este efeito com valores numéricos, como por exemplo na frequência de 600 Hz, 800 Hz e 900 Hz com hélice inclinada em 20° .

5.2 SIMULAÇÃO

Nesta seção será evidenciados os resultados referentes às simulações dos Silenciadores Primários e Secundários. Em média, cada simulação teve um tempo de 1 hora de solução para os componentes computacionais de processamento usados (CPU – Intel® Core™ I5-8265U).

5.2.1 SILENCIADORES PRIMÁRIOS

Gráfico 5.2.1.1 – PT simulação Silenciadores Primários



Fonte: próprio autor

De acordo com o Gráfico 5.2.1.1 é possível observar que os silenciadores simulados atuam aproximadamente nas frequências nas quais foram construídos para atuar. Além disso, é possível notar que um mesmo silenciador atua em diferentes frequências das quais foram designadas, corroborando com o efeito explicado nos Gráficos 5.1.3 e 5.1.4.

A Tab. 5.2.1.1 apresenta os valores de pico de perda de transmissão sonora, suas respectivas frequências e erro em porcentagem comparada à frequência estabelecida analiticamente:

Tabela 5.2.1.1 – Valores de pico de perda de transmissão sonora

| Freq. Modelagem | 300 Hz | 500 Hz | 800 Hz |
|------------------|----------|----------|----------|
| Freq. Simulação | 276 Hz | 498 Hz | 852 Hz |
| Perda de transm. | 22,69 dB | 18,70 dB | 34,94 dB |
| Erro (%) | 8,0% | 0,4% | 6,5% |

Fonte: próprio autor

Vale ressaltar uma característica inerente de um metamaterial acústico que é sua dimensão menor que a de comprimento de onda a qual se propõe atenuar. No caso dos silenciadores apresentados, essas características são mostradas numericamente segundo a Tab. 5.2.1.2:

Tabela 5.2.1.2 – Comparativo comprimento de onda x espessura silenciador

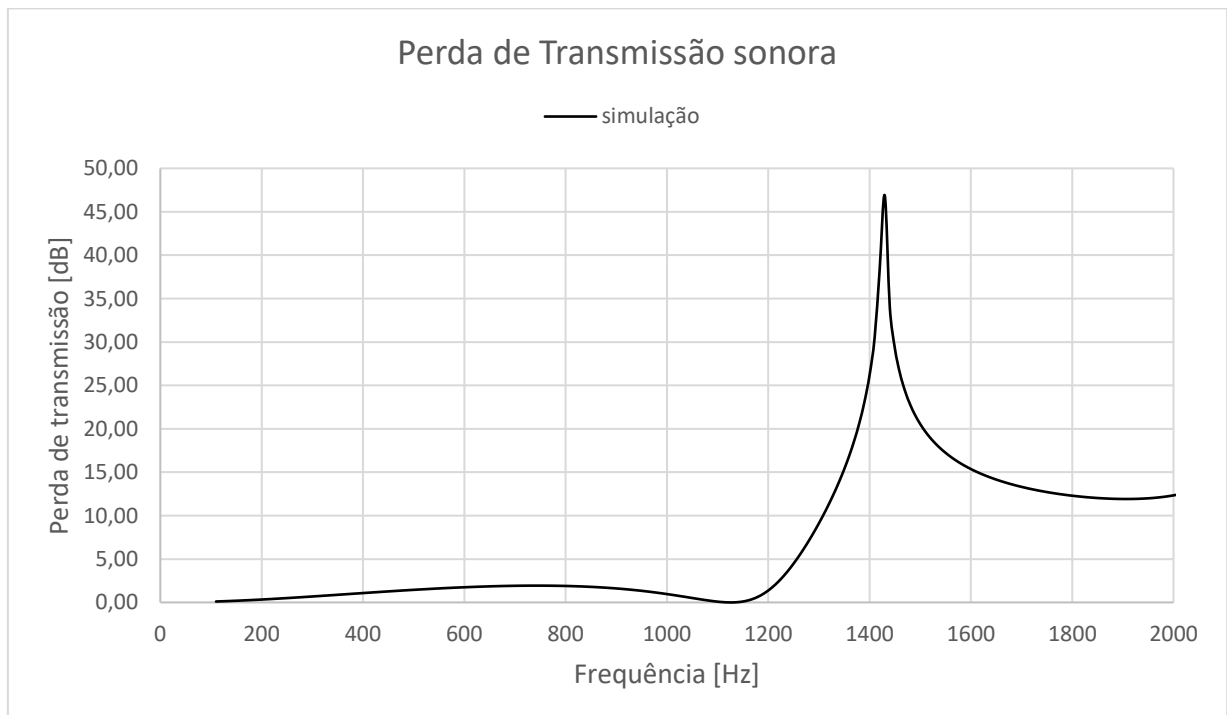
| Freq. Simulação | 300 Hz | 500 Hz | 800 Hz |
|------------------------|-----------|----------|-----------|
| Comp. De onda | 1143,3 mm | 686,0 mm | 428,75 mm |
| Espessura (t) | 99,3 mm | 59,6 mm | 37,2 mm |
| Comparação (%) | 8,7% | 8,7% | 8,7% |

Fonte: próprio autor

Para os parâmetros utilizados para modelagem geométrica há uma tendência de a relação espessura por comprimento de onda ser constantemente 8,7%.

5.2.2 SILENCIADOR SECUNDÁRIO

Gráfico 5.2.2.1 – Curva PT simulação do Silenciador Secundário



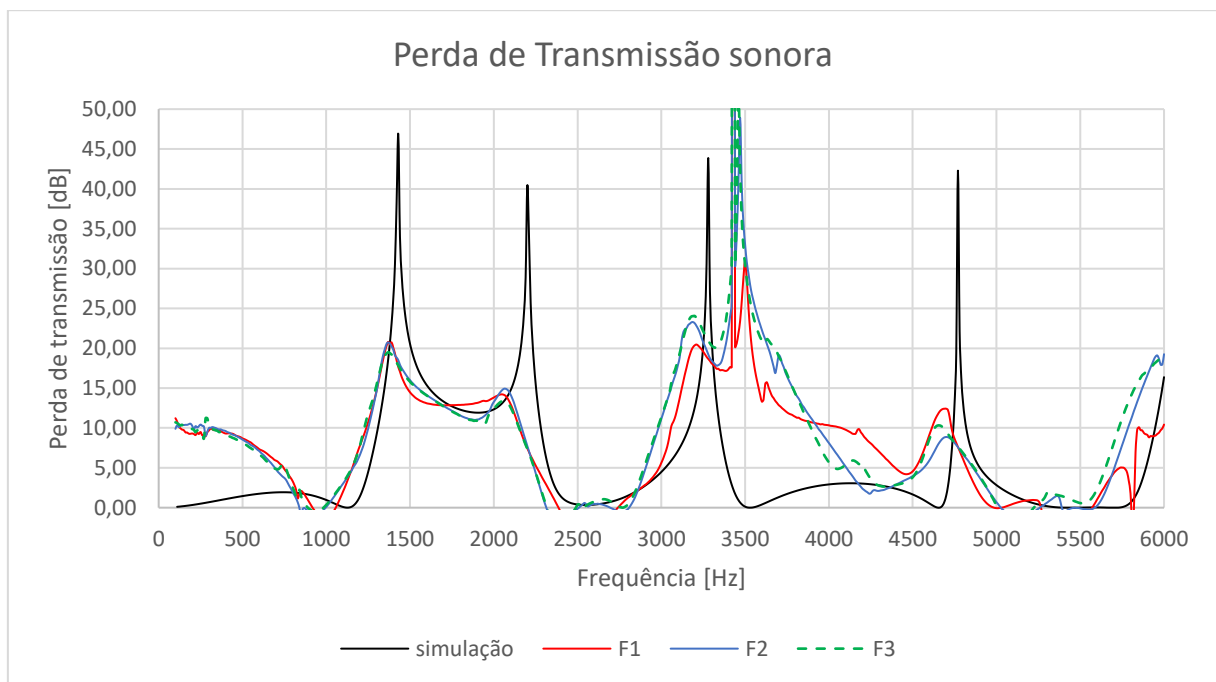
Fonte: próprio autor

Este modelo de Silenciador proposto, de acordo com o Gráfico 5.2.2.1 possui uma melhor eficiência em frequências acima de 1200 Hz aproximadamente. Dentro da faixa de 0 – 2000 Hz, possui um pico de 46,89 dB de perda de transmissão em 1420 Hz. Dessa forma, é um silenciador que se aplicaria bem em médias para altas frequências.

5.3 ENSAIOS TUBO DE IMPEDÂNCIA

Nesta seção será evidenciado as curvas de perda de transmissão dos Silenciadores Secundários ensaiados no tubo de impedância.

Gráfico 5.3.1 – Curvas de PT dos Silenciadores Secundários

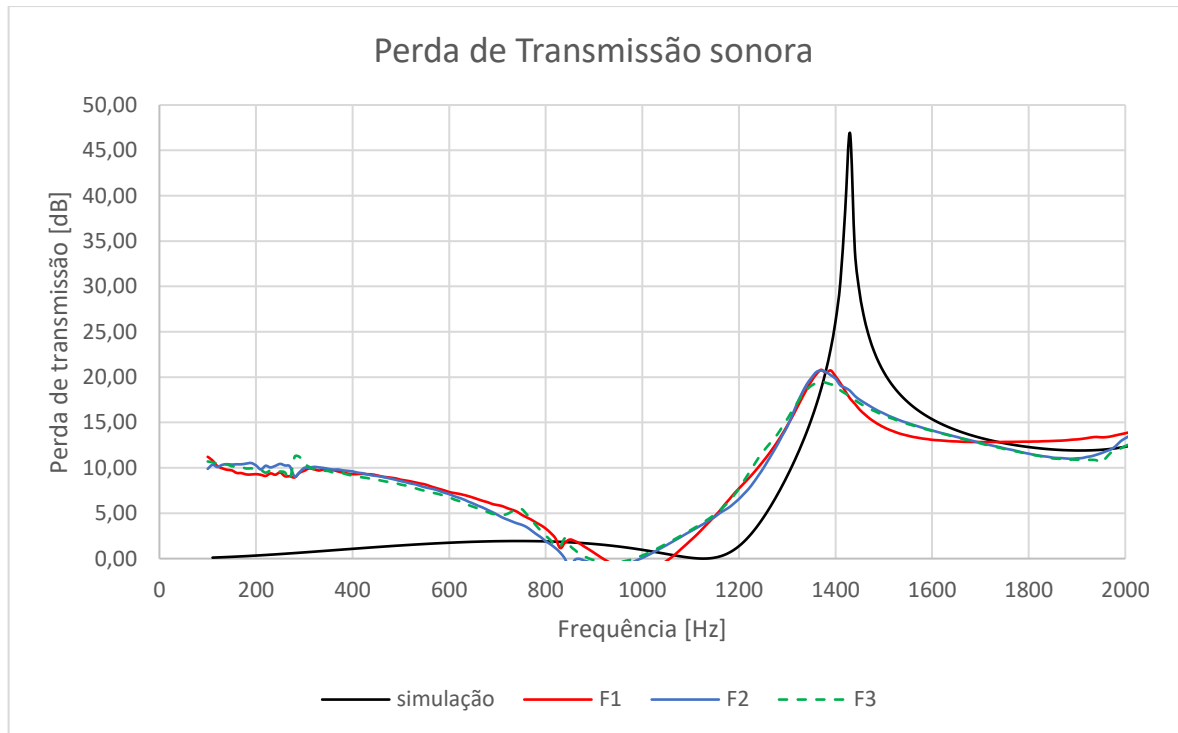


Fonte: próprio autor

A análise do gráfico 5.3.1 permite inferir que as curvas de perda de transmissão dos modelos ensaiados seguem o mesmo comportamento observado no modelo simulado. Ademais, não foi identificada uma diferença significativa na perda de transmissão em função do acabamento superficial, sugerindo que este parâmetro não exerce influência relevante no desempenho do silenciador.

Para uma melhor observação foi ampliado o gráfico para a faixa de frequência baixa entre 0 – 2000Hz que é uma região de interesse para aplicação de metamateriais.

Gráfico 5.3.2 – Curvas de PT ampliadas dos Silenciadores Secundários



Fonte: próprio autor

Diante do Gráfico 5.3.2, na faixa estabelecida o pico dos modelos ensaiado ocorre em 1370 Hz tendo 20,8 dB, 20,7 dB e 19,5 dB consecutivamente para o primeiro, segundo e terceiro modelo denotados como F1, F2 e F3. Em comparação ao modelo simulado é um erro de 3,5% em relação à frequência e uma diferença de 26,1 dB, 26,2 dB e 27,4 dB consecutivamente em relação ao pico de perda de transmissão de cada silenciador.

6 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos e metodologia aplicada, podem ser tomadas algumas conclusões, tanto baseadas na fundamentação teórica quanto nos trabalhos que antecederam este evidenciados nos capítulos 2 e 3 respectivamente. Diante disso, é possível concluir que os objetivos foram parcialmente alcançados, uma vez que os resultados analíticos, simulados e ensaiados se alinham com uma margem de erro.

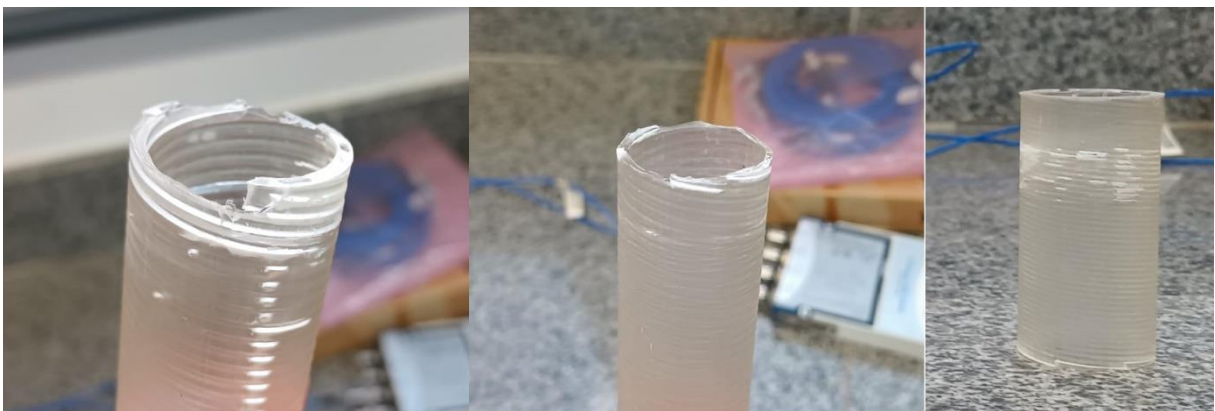
Dessa maneira, por meio do Gráfico 5.2.1.1 e a Tab. 5.2.1.1 é evidente que o metamaterial cujos parâmetros geométricos são obtidos por meio das equações do capítulo 4.1 é validado por meio da simulação, possuindo um erro de no máximo 8,0% e no mínimo 0,4% em relação às frequências que deviam silenciar. Uma hipótese para melhorar este erro é modelar com mais precisão o ângulo das hélices, uma vez que este parâmetro não era uma variável de fácil controle dentro do software *Inventor*®, portanto, buscar o uso de outros softwares de modelagem que possuem esse controle seja uma saída para melhorar este resultado.

Em relação ao ensaio, este se mostrou relativamente próximo do modelo que foi simulado também, como observado nos Gráfico 5.3.1 e Gráfico 5.3.2, onde o comportamento da curva é o mesmo para os modelos ensaiados e simulados. Pelo Gráfico 5.3.2, as curvas de PT se aproximaram bem com relação à frequência de maior perda de transmissão com um erro de apenas 3,5%, porém se distanciaram bastante em valores absolutos em termos de perda de transmissão. Portanto é possível concluir que os silenciadores simulados e ensaiados atuam numa mesma região de frequência, porém com valores de perda de transmissão significativamente diferentes.

A análise dos gráficos 5.3.1 e 5.3.2 permite concluir que as propriedades do material, como a rugosidade das superfícies, não são influentes na curva de PT. Em contrapartida, os fatores geométricos demonstram ser o principal parâmetro determinante para o comportamento observado, o que é de fato uma característica essencial de um metamaterial. Portanto, a variabilidade de fabricação do metamaterial pelas variadas técnicas de manufatura aditiva não vão ser relevante no ponto de vista de performance do silenciador, mas vai ser impactante em termos de facilidade e possibilidade de fabricação.

Dessa forma, vale ressaltar um fator fundamental em relação aos modelos físicos dos silenciadores, que foi sua fabricação. Em uma primeira instância buscou-se fabricar os Modelos Primários (Fig. 4.2.1) em impressão 3D em resina para ensaiá-los, porém, como ilustrado na Fig. 6.1, houve falhas devido às dimensões de escala de $0,5\text{ mm}$, ocasionando rompimento das paredes do tubo, entupimento das espirais onde deveria passar ar e quebra das extremidades ao remover o material da impressora 3D.

Figura 6.1 – Defeitos da fabricação dos silenciadores



Fonte: próprio autor

Defeitos, como entupimento dos canais de ar nas espirais eram esperados, diferentemente das trincas nas paredes e as extremidades quebradas, mostrando a fragilidade do modelo para os parâmetros geométricos usados. Dessa forma, a fragilidade dos modelos físicos fabricados foi um ponto limitante, impactando na validação experimental de forma mais robusta.

Existem três formas de contornar essa problemática, que seria utilizar outros valores de entrada de geometria, como por exemplo utilizar um menor valor de razão Z_2/Z_1 . Outra alternativa é utilizar um tubo de impedância com um diâmetro maior que $30,0\text{ mm}$, o que aumentaria a escala do metamaterial para se adequar ao tubo e facilitaria a fabricação aditiva. Por fim, a última alternativa seria utilizar de uma impressão 3D com base em sinterização a laser que possui melhor exatidão e precisão para fabricação de peças no geral.

Para investigações futuras, seria pertinente analisar os efeitos do escoamento, como as perdas de carga, ao atravessar metamateriais acústicos, bem como o impacto dos parâmetros geométricos sobre essa característica. Tal análise

possibilitaria uma compreensão mais aprofundada do efeito das propriedades fluídicas no desempenho do metamaterial, especialmente em contextos de interação fluido-estrutura. Além disso, seria fundamental estudar a aplicabilidade do silenciador, considerando essas variáveis.

REFERÊNCIAS

ASTM E2611-17. **Standard test method for measurement of transmission loss of acoustical materials using a tube, two-microphone method**. 1. ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

BIES, David A.; HANSEN, Colin H. **Engineering noise control: theory and practice**. 3. ed. CRC Press, 2003.

COOK, Robert D.; MALKUS, David S.; PLESHA, Michael E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

ENGHETA, Nader; ZIOLKOWSKI, Richard W. **Metamaterials: Physics and Engineering Explorations**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2006. ISBN 9780471761020.

GHAFFARIVARDAVAGH, Reza; NIKOLAJCZYK, Jacob; ANDERSON, Stephan; ZHANG, Xin. **Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference**. Boston, 2018.

HOWARD, Carl; CAZZOLATO, Benjamin. **Acoustic analyses using MATLAB and ANSYS**. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 708 p. eBook ISBN: 9780429069642. DOI: <https://doi.org/10.1201/b17825>.

ISO 10534-2. **Acoustics – Determination of acoustic properties in impedance tubes – Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance**. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.

LIMA, Key F. **Metodologia de avaliação de filtros acústicos reativos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LIU, Junyi; GUO, Hanbei; WANG, Ting. A Review of ***Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals***. *Applied Sciences*, v. 10, n. 17, p. 5930, 2020.

NUNES, Luan P. P. **Projeto de aparato experimental para análise de perda de transmissão sonora**. Goiânia, Brasil. 2017.

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.

PIERCE, Allan D. ***Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications***. 2. ed. New York: Acoustical Society of America, 1989.

RIOS, Henrique S. **Investigação experimental da perda de transmissão sonora em câmaras de expansão**. Goiânia, Brasil. 2017

ROSHING, Thomas D.; WHEELER, Paul; MOORE, F. Richard. ***The Science of Sound***. 3. ed. San Francisco: Addison-Wesley, 2002.

SHELBY, R.A., SMITH, D.R. and SCHULTZ, S. ***Experimental Verification of a Negative Index of Refraction***. *Science*, v. 292, 2001.

SILVA, Thobias Ampessan Lemos da. **Investigação experimental dos efeitos da variabilidade de fabricação em metamateriais acústicos**. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, 2016. 92 f. Orientador: Adriano T. Fabro.

TANIMITSU, Gabriela Yumi Rezende. **Adequação do tubo de impedância do laboratório de mecânica aplicada da universidade federal de goiás para medição da perda de transmissão sonora pelo método das duas cargas**. Goiânia, Brasil, 2023

TAO, Z.; SEYBERT, A. F. ***A review of current techniques for measuring muffler transmission loss***. SAE Technical Paper, n. 2003-01-1653, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2003-01-1653>.

APÊNDICE A – Dados de geometria

| Freq. (Hz) | 300 | | 400 | | 500 | | 600 | |
|------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| ϕ (°) | t (mm) | r1 (mm) | t (mm) | r1 (mm) | t (mm) | r1 (mm) | t (mm) | r1 (mm) |
| 10° | 99,3 | 13,8 | 74,5 | 13,5 | 59,6 | 13,2 | 49,6 | 12,9 |
| 20° | 195,5 | 14,3 | 146,6 | 14,1 | 117,3 | 14,0 | 97,8 | 13,8 |
| 30° | 285,8 | 14,5 | 214,4 | 14,4 | 171,5 | 14,3 | 142,9 | 14,1 |
| 40° | 367,5 | 14,6 | 275,6 | 14,5 | 220,5 | 14,4 | 183,7 | 14,3 |
| 50° | 437,9 | 14,7 | 328,4 | 14,6 | 262,8 | 14,5 | 219,0 | 14,4 |
| 60° | 495,1 | 14,7 | 371,3 | 14,6 | 297,0 | 14,6 | 247,5 | 14,5 |
| 70° | 537,2 | 14,7 | 402,9 | 14,7 | 322,3 | 14,6 | 268,6 | 14,5 |
| 80° | 563,0 | 14,8 | 422,2 | 14,7 | 337,8 | 14,6 | 281,5 | 14,5 |
| 90° | 571,7 | 14,8 | 428,8 | 14,7 | 343,0 | 14,6 | 285,8 | 14,5 |

| Freq. (Hz) | 700 | | 800 | | 900 | | 1000 | |
|------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| ϕ (°) | t (mm) | r1 (mm) | t (mm) | r1 (mm) | t (mm) | r1 (mm) | t (mm) | r1 (mm) |
| 10° | 42,5 | 12,6 | 37,2 | 12,4 | 33,1 | 12,2 | 29,8 | 12,0 |
| 20° | 83,8 | 13,6 | 97,8 | 13,8 | 97,8 | 13,8 | 58,7 | 13,1 |
| 30° | 122,5 | 14,0 | 142,9 | 14,1 | 142,9 | 14,1 | 85,8 | 13,6 |
| 40° | 157,5 | 14,2 | 183,7 | 14,3 | 183,7 | 14,3 | 110,2 | 13,9 |
| 50° | 187,7 | 14,3 | 219,0 | 14,4 | 219,0 | 14,4 | 131,4 | 14,1 |
| 60° | 212,2 | 14,4 | 247,5 | 14,5 | 247,5 | 14,5 | 148,5 | 14,2 |
| 70° | 230,2 | 14,4 | 268,6 | 14,5 | 268,6 | 14,5 | 161,2 | 14,2 |
| 80° | 241,3 | 14,5 | 281,5 | 14,5 | 281,5 | 14,5 | 168,9 | 14,2 |
| 90° | 245,0 | 14,5 | 285,8 | 14,5 | 285,8 | 14,5 | 171,5 | 14,3 |