



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E ACÚSTICA

Iago Cassettari

**Aplicação da Técnica de Corte a Laser e Camadas Justapostas para Avaliação
de Metamateriais Absorvedores Acústicos do Tipo Labiríntico**

Florianópolis/SC

2023

Iago Cassettari

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE CORTE A LASER E CAMADAS JUSTAPOSTAS PARA
AVALIAÇÃO DE METAMATERIAIS ABSORVEDORES ACÚSTICOS DO TIPO LABIRÍNTICO

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Área de concentração: Vibrações e Acústica
Orientador: Prof. Erasmo Felipe Vergara Miranda, Dr. Eng.

Florianópolis/SC

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cassettari, Iago

Aplicação da Técnica de Corte a Laser e Camadas
Justapostas para Avaliação de Metamateriais Absorvedores
Acústicos do Tipo Labiríntico / Iago Cassettari ;
orientador, Erasmo Felipe Vergara, 2023.

158 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Absorção sonora. 3.
Metamaterial acústico labiríntico. 4. Fabricação por corte a
laser. I. Vergara, Erasmo Felipe. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. III. Título.

Iago Cassettari

Aplicação da Técnica de Corte a Laser e Camadas Justapostas para Avaliação de Metamateriais Absorvedores Acústicos do Tipo Labiríntico

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Key Fonseca de Lima, Dr. Eng.
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Prof. Erasmo Felipe Vergara Miranda, Dr. Eng.
Orientador

Florianópolis, 2023.

Dedico este trabalho ao meu pai Jacob Cassettari Junior
e minha mãe Angelita Merkle Cassettari (*in memoriam*).

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha mais profunda gratidão ao meu pai, que sempre foi uma inspiração para mim. Sua constante motivação e apoio guiaram-me através desta incrível jornada acadêmica. Sem sua presença e encorajamento, este feito poderia não ter sido possível.

Não posso deixar de homenagear minha amada mãe, que partiu quando eu era pequeno, mas cujo espírito vive em meu coração. Suas conquistas e sua compaixão para com os outros sempre serviram de farol orientador em minha vida. Sua maneira de ver o mundo, mesmo em meio às adversidades, deixou uma marca indelével em minha alma e moldou a pessoa que sou hoje. Embora ela não esteja aqui para compartilhar este momento, sinto sua presença e amor permeando cada etapa desta jornada. O seu legado continua a inspirar e a orientar-me, e esta conquista é, em grande parte, um tributo à sua memória.

Quero também estender meus sinceros agradecimentos à minha família e aos meus queridos amigos. Suas presenças firmes e inabaláveis foram fundamentais para me manter firme e focado durante os períodos mais desafiadores. O amor, a paciência e o apoio de vocês foram inestimáveis.

O meu agradecimento ao meu orientador é indispensável. Sou eternamente grato pela oportunidade que me deu e pelo apoio incondicional durante a elaboração deste trabalho. Seu mentorado foi essencial para meu desenvolvimento pessoal e acadêmico, e sua orientação criteriosa e ponderada foi de inestimável valor.

Um agradecimento especial também à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), aos professores dedicados e a todos no Laboratório de Vibrações e Acústica. Agradeço-lhes por esses anos de paciente e segura transmissão de conhecimento. Cada um de vocês contribuiu de maneira significativa para o meu crescimento como pesquisador e para a conclusão deste projeto.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todas as outras pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para o sucesso deste trabalho. Cada contribuição, não importa quão pequena, desempenhou um papel crucial em minha jornada.

Agradeço a todos vocês do fundo do meu coração.

Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros
de gigantes.

Sir Isaac Newton

Resumo

A busca por soluções eficientes em tratamentos acústicos levou ao desenvolvimento de metamateriais acústicos, os quais podem substituir materiais convencionais devido ao seu melhor desempenho em frequências específicas e dimensões reduzidas. Os metamateriais são estruturas artificiais com propriedades acústicas controladas, capazes de absorver ou refletir ondas sonoras. Neste contexto, a técnica de fabricação por corte a laser e montagem por camadas justapostas surge como uma alternativa promissora para produzir esses materiais em escala. A pesquisa envolveu análise teórica e numérica de modelos de metamateriais contidos na bibliografia, assim como a fabricação de amostras para ensaios experimentais utilizando um aparato de tubo de impedância. A fabricação das amostras foi realizada com uma cortadora laser CNC em materiais como MDF e acrílico, seguindo a técnica de camadas justapostas e utilizando cola como adesivo. Algumas amostras também foram produzidas por meio da técnica de impressão 3D com objetivo da comparação de desempenho. Ao longo da pesquisa, foram projetadas e avaliadas experimentalmente 316 amostras para o estudo do desempenho acústico. Os resultados foram comparados com os modelos teóricos e numéricos para garantir a confiabilidade dos resultados. A análise estatística das amostras revelou que os dados coletados se aproximaram dos modelos teóricos, demonstrando a efetividade do controle estatístico de processos na garantia da qualidade das amostras com propriedades acústicas controladas. As análises do desempenho acústico das amostras também foram efetuadas para verificar a influência de: diferentes materiais de fabricação, enrolamento da cavidade enrolada, tipos de perfurações do painel, largura de banda de frequência, vazamento devido à montagem e análise de sensibilidade dos parâmetros geométricos. Foi obtido o pico de absorção sonora acima de 85% para amostras fabricadas com a técnica de corte laser com camadas justapostas para a frequência de 300 Hz, já para 400 Hz, o pico de absorção unitário foi atingido. Com relação à absorção em banda larga para baixas frequências, foi atingido o desempenho de absorção sonora acima de 80% para as frequências de 390 Hz até 620 Hz para uma amostra com simultaneamente três perfurações. Além disso, a comparação dos custos de produção com outras técnicas, como a impressão 3D, mostrou a viabilidade financeira do uso do corte a laser, com redução considerável dos custos e tempo de fabricação. Em síntese, a técnica de corte a laser e montagem por camadas justapostas mostrou-se promissora na fabricação de metamateriais acústicos absorvedores, proporcionando eficiência na absorção de baixas frequências (300 Hz a 600 Hz). Essa abordagem oferece benefícios como redução de custos, facilidade de fabricação em escala e controle de qualidade, tornando-se uma alternativa viável para aplicações em tratamentos acústicos em diversos setores.

Palavras-chave: Metamaterial absorvedor acústico. Cavidades de espaços enrolados. Cortes a laser. Controle Estatístico do Processo.

Abstract

The search for efficient solutions in acoustic treatments led to the development of acoustic metamaterials, which can replace conventional materials due to their superior performance at specific frequencies and reduced dimensions. Metamaterials are artificial structures with controlled acoustic properties, capable of absorbing or reflecting sound waves. In this context, the fabrication technique of laser cutting and layer-by-layer assembly emerges as a promising alternative to produce these materials on a scale. The research involved theoretical and numerical analysis of metamaterial models found in the literature, as well as the fabrication of samples for experimental tests using an impedance tube apparatus. The samples were made with a CNC laser cutter using materials like MDF and acrylic, following the layer-by-layer technique and using glue as adhesive. Some samples were also produced using 3D printing for performance comparison purposes. Throughout the research, 316 samples were designed and experimentally evaluated for acoustic performance. The results were compared to theoretical and numerical models to ensure the reliability of the findings. Statistical analysis of the samples revealed that the collected data closely matched theoretical models, demonstrating the effectiveness of statistical process control in ensuring the quality of samples with controlled acoustic properties. Performance analyses of the samples were also conducted to examine the influence of: different manufacturing materials, winding of the coiled cavity, types of panel perforations, bandwidth frequency, leakage due to assembly, and sensitivity analysis of geometric parameters. A sound absorption peak above 85% was obtained for samples manufactured using the laser cutting technique with juxtaposed layers for a frequency of 300 Hz, while at 400 Hz, the unitary absorption peak was reached. Regarding broadband absorption for low frequencies, sound absorption performance above 80% was achieved for frequencies from 390 Hz to 620 Hz for a sample with three perforations simultaneously. Furthermore, the cost comparison with other techniques, such as 3D printing, demonstrated the financial viability of using laser cutting, with significant reductions in costs and manufacturing time. In summary, the laser cutting technique and layer-by-layer assembly proved promising in the fabrication of absorptive acoustic metamaterials, offering efficiency in absorbing low frequencies (300 Hz to 600 Hz). This approach provides benefits like cost reduction, ease of large-scale fabrication, and quality control, making it a viable alternative for applications in acoustic treatments across various sectors.

Keywords: Acoustic absorbing metamaterial. Coiled space cavities. Laser cuts. Statistical Process Control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Linha do tempo dos trabalhos de conclusão de graduação e pós-graduação de pesquisas de metamateriais acústicos do LVA da UFSC.	30
Figura 2 – Absorvedores porosos.	33
Figura 3 – Absorvedor acústico do tipo ressonador.	34
Figura 4 – Absorvedores do tipo membrana.	35
Figura 5 – Absorvedores do tipo microperfurado.	36
Figura 6 – Camada porosa em frente a uma parede rígida.	37
Figura 7 – Materiais eletromagnéticos	39
Figura 8 – Demonstração massa efetiva negativa.	41
Figura 9 – Demonstração do módulo de volume efetivo negativo.	43
Figura 10 – Dimensões das cavidades de espaços enrolados.	44
Figura 11 – Célula unitária de metamaterial acústico com perfuração do tipo circular.	46
Figura 12 – Célula unitária de metamaterial acústico com perfuração do tipo quadrado.	46
Figura 13 – Célula unitária de metamaterial acústico com perfuração do tipo fenda.	47
Figura 14 – Equipamento de corte a laser.	49
Figura 15 – Tubo de geração do feixe de luz laser.	50
Figura 16 – Diagrama esquemático de um laser Nd:YAG mostrado em seção transversal.	51
Figura 17 – Esquema da geração do laser de fibra.	52
Figura 18 – Controle estatístico de processos.	54
Figura 19 – Análise da capacidade de processos.	56
Figura 20 – Fluxograma das principais etapas seguidas durante o desenvolvimento da pesquisa.	58
Figura 21 – Modelo numérico criado utilizando o <i>software</i> COMSOL.	60
Figura 22 – Comparativo malha para execução da simulação para uma cavidade com diferentes enrolamentos ($n=2$, $n=3$ e $n=4$).	63
Figura 23 – Comparativo do coeficiente de absorção sonora para malhas com e sem refinamento e para cavidade com diferentes enrolamentos ($n=2$, $n=3$ e $n=4$).	64
Figura 24 – Malha utilizada no modelo numérico com cavidades compostas.	65
Figura 25 – Comparativo da absorção sonora entre diferentes malhas para modelos com cavidades compostas.	66
Figura 26 – Verificação da diferença do refinamento da malha para simulações numéricas.	67
Figura 27 – Amostra de metamaterial acústico produzido utilizando a técnica de corte a laser e camadas justapostas.	68

Figura 28 – Parte da amostra de metamaterial acústico fabricada em madeira MDF utilizando a técnica de corte a laser e camadas justapostas.	69
Figura 29 – Peças projetadas e manufaturadas, em diferentes materiais com 3 mm de espessura.	70
Figura 30 – Peças utilizadas para avaliar o processo de manufatura de diferentes perfurações para diferentes materiais.	70
Figura 31 – Peças manufaturadas por meio do corte a laser para avaliar o processo de colagem das camadas.	71
Figura 32 – Camadas individuais utilizadas para montagem das amostras.	73
Figura 33 – Processo de montagem de amostras de espaço enrolado, $n=2$ em MDF.	74
Figura 34 – Cadeia de sinal da bancada experimental para análise com tubo de impedância.	75
Figura 35 – Formação das amostras utilizadas para o estudo de variação devido ao processo produtivo.	77
Figura 36 – Amostras utilizadas para a avaliação da absorção do material.	80
Figura 37 – Absorção sonora para diferentes materiais.	80
Figura 38 – Malha utilizada para a simulação numérica para obter o coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância superficial.	81
Figura 39 – Coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância superficial.	82
Figura 40 – Circuito acústico equivalente.	83
Figura 41 – Malha utilizada para a simulação numérica para obter o coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância adicional amostra $n=1$, fenda.	83
Figura 42 – Coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância adicional amostra $n=1$, fenda (0,6 x 5,9 x 2,9).	84
Figura 43 – Coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância adicional amostra $n=1$ - fenda (1,2 x 5,9 x 2,9).	85
Figura 44 – Amostra de metamaterial acústico do tipo espaço enrolado sem tampa.	86
Figura 45 – Absorção sonora, para diferentes valores de absorção interna adicional, para metamaterial acústico do tipo espaço enrolado paralelo, com $n=5$, sem tampa.	87
Figura 46 – Absorção sonora, para diferentes valores de absorção interna adicional, para metamaterial acústico do tipo espaço enrolado $n=2$, sem tampa.	88
Figura 47 – Absorção sonora, para diferentes valores de absorção interna adicional, para metamaterial acústico do tipo espaço enrolado $n=2$, sem tampa.	89
Figura 48 – Determinação do fator de correção devido ao aproveitamento da amostra fabricada.	90
Figura 49 – Montagem experimental das amostras.	91

Figura 50 – Malha utilizada para a simulação numérica para obter o coeficiente de absorção sonora para diferentes números de cavidades.	92
Figura 51 – Comparação do coeficiente de absorção para diferentes fatores de aproveitamento da amostra n=2 - Circular (d=2,13 mm).	93
Figura 52 – Aplicação do fator de correção para diferentes fatores de aproveitamento da amostra n=2 - Circular (d=2,13 mm).	95
Figura 53 – Aplicação do fator de correção para diferentes fatores de aproveitamento da amostra n=2 - Circular (d=2,13 mm).	96
Figura 54 – Malha de elementos finitos construída para simulação.	97
Figura 55 – Comparação do coeficiente de absorção para dois valores de fator de aproveitamento da amostra n=1, fenda (0,6 x 5,9 x 2,9).	98
Figura 56 – Comparação do coeficiente de absorção para dois valores de fator de aproveitamento da amostra n=1, fenda (1,2 x 5,9 x 2,9).	98
Figura 57 – Verificação do anel de vedação para perfuração circular e quadrada e cavidade de espaço enrolado n=2 em MDF.	99
Figura 58 – Verificação do anel de vedação para perfuração fenda e cavidade de espaço enrolado n=2 em MDF.	100
Figura 59 – Verificação da influência do anel de vedação para amostra com simultaneamente duas dimensões de perfurações quadradas e cavidade de espaço enrolado, n=2, em acrílico.	101
Figura 60 – Amostras manufaturadas em MDF utilizadas na avaliação estatística. .	102
Figura 61 – Resultado dos modelos analítico e numérico para ensaio de repetibilidade.	103
Figura 62 – Resultados do ensaio de repetibilidade para 5 conjuntos de medições do coeficiente de absorção sonora.	104
Figura 63 – Boxplot e Cartas de controle.	106
Figura 64 – Histograma e análise de capacidade.	107
Figura 65 – <i>Boxplot</i> do valor da frequência pico com os valores médios para cada avaliador, sem e com o ajuste proposto.	108
Figura 66 – Boxplot e cartas de controle.	109
Figura 67 – Histograma e análise de capacidade.	110
Figura 68 – Comparativo dos resultados de amostras construídas com diferentes materiais com perfuração quadrada. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	113

Figura 69 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes enrolamentos com perfuração circular. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	114
Figura 70 – Comparativo dos valores de absorção sonora para os modelos analítico e numérico com variação do valor de b_0 para amostras com perfuração quadrada e dimensões: $L_q = 2,0$ mm; $t = 3,0$ mm; $h = 32,0$ mm; $T = 5,0$ mm. a) $L = 48,0$ mm; $m = 13,0$ mm; $b_0 = 1,0$ mm. b) $L = 50,0$ mm; $m = 15,0$ mm; $b_0 = 3,0$ mm. c) $L = 52,0$ mm; $m = 17,0$ mm; $b_0 = 5,0$ mm.	116
Figura 71 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com $n=2$ sintonizadas para frequência de 300 Hz. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	118
Figura 72 – Modelo numérico para a distribuição de pressão e velocidade na região próxima à perfuração.	120
Figura 73 – Dissipação total de energia no interior da cavidade de metamaterial acústico.	120
Figura 74 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com dimensões das cavidades constantes. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	122
Figura 75 – Comparativo dos resultados para a amostra D106. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	124
Figura 76 – Modelo numérico para a amostra D106 em diferentes frequências.	125
Figura 77 – Determinação do indicador Q_α das amostras D98, D99, D100 e D106.	126
Figura 78 – Comparativo dos resultados de amostras com diferentes vedações das cavidades. a) Plano de frequência complexa. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. c) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. d) Absorção sonora. e) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. f) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	128

Figura 79 – Comparativo dos resultados de amostras com perfuração fenda, com parâmetro d_f variável. a) Análise de sensibilidade para a amostra A. b) Absorção sonora analítico. c) Absorção sonora numérico. d) Absorção sonora experimental. e) Coeficiente de reflexão parte real para as amostras A28, A31 e A62.	130
Figura 80 – Amostra de metamaterial retangular 160 mm x 160 mm.	132
Figura 81 – Coeficiente de absorção sonora para a variação do parâmetro da perfuração com dimensões fixas: $t = 3,0$ mm; $L = 50,0$ mm; $m = 15,0$ mm; $h = 30,0$ mm; $T = 3,0$ mm e $b_0 = 3,0$ mm.	146
Figura 82 – Coeficiente de absorção sonora para a variação do parâmetro t e amostra com perfuração circular e dimensões fixas: $d = 2,4$ mm; $L = 50,0$ mm; $m = 15,0$ mm; $h = 30,0$ mm; $T = 3,0$ mm e $b_0 = 3,0$ mm.	147
Figura 83 – Coeficiente de absorção sonora para a variação do parâmetro da cavidade com dimensões fixas: $t = 3,0$ mm; $T = 3,0$ mm e $d = 2,4$ mm.	148
Figura 84 – Processo de montagem de amostras de espaço enrolado, $n=2$ em acrílico.	149
Figura 85 – Aparato do tubo de impedância.	150
Figura 86 – Detalhamento das amostras.	150
Figura 87 – Detalhamento do porta-amostra com massa de calafetar vedando as frestas.	150
Figura 88 – Comparativo dos resultados de amostras construídas com diferentes materiais com perfuração quadrada com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	151
Figura 89 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes enrolamentos com perfuração circular com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	152
Figura 90 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com $n=2$ sintonizadas para frequência de 300 Hz com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	152

Figura 91 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com dimensões das cavidades constantes com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	153
Figura 92 – Comparativo dos resultados para a amostra D106 com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	153
Figura 93 – Comparativo dos resultados de amostras com diferentes vedações das cavidades com dados experimentais brutos. a) Plano de frequência complexa. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. c) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. d) Absorção sonora. e) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. f) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	154
Figura 94 – Comparativo dos resultados de amostras com perfuração fenda, com parâmetro d_f variável com dados experimentais brutos. a) Análise de sensibilidade para a amostra A. b) Absorção sonora analítico. c) Absorção sonora numérico. d) Absorção sonora experimental. e) Coeficiente de reflexão parte real para as amostras A28, A31 e A62.	154
Figura 95 – Aplicação do fator de correção para diferentes fatores de aproveitamento utilizando modelo sem corrigir absorção adicional da amostra n=2 - Circular (d=2,13 mm).	155
Figura 96 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes enrolamentos com perfuração quadrada. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	156
Figura 97 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes enrolamentos com perfuração fenda. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	156

Figura 98 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com $n=2$ sintonizadas para frequência de 350 Hz. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.	157
Figura 99 – Dissipação térmica e viscosa, avaliadas de maneira independente com o modelo numérico.	158

Lista de quadros

Quadro 1 – Classificação dos principais metamateriais acústicos.	40
Quadro 2 – Informações do modelo numérico de MMA com uma cavidade e malha extremamente fina.	62
Quadro 3 – Informações do processamento do modelo numérico de MMA com cavidades compostas.	64
Quadro 4 – Informações do modelo numérico de MMA para a geometria completa.	67
Quadro 5 – Equipamentos utilizados para aferir as amostras.	69
Quadro 6 – Especificação técnica da cortadora laser utilizada para fabricação das amostras.	72
Quadro 7 – Parâmetros das amostras utilizados no CEP.	102
Quadro 8 – Informações sobre os ensaios.	104
Quadro 9 – Parâmetros utilizados para dimensionamento das cavidades das amostras.	111
Quadro 10 – Parâmetros utilizados para dimensionamento dos painéis frontais das amostras.	111
Quadro 11 – Parâmetros utilizados para dimensionamento dos painéis frontais com múltiplos picos de absorção.	123
Quadro 12 – Cavidades dimensionadas para avaliação da influência do vazamento entre as camadas da amostra.	127
Quadro 13 – Síntese dos ensaios com tubo de impedância realizados.	133

Lista de tabelas

Tabela 1 – Ordem das amostras para realização dos ensaios de absorção acústica para o estudo de variação devido ao processo produtivo.	77
Tabela 2 – Modelo utilizado para aplicação do CEP para os parâmetros das amostras.	78
Tabela 3 – Aplicação do fator de correção para diferentes fatores de aproveitamento da amostra n=2 - Circular (d=2,13 mm).	93
Tabela 4 – Valores das frequências em que ocorrem os picos de absorção para as amostras avaliadas.	105
Tabela 5 – Síntese das curvas comparando diferentes valores de enrolamento. . . .	115
Tabela 6 – Síntese dos indicadores de desempenho das curvas para as perfurações: circular, quadrada e fenda.	119
Tabela 7 – Síntese dos indicadores de desempenho das curvas para diferentes valores de perfuração.	122
Tabela 8 – Síntese dos indicadores de desempenho das curvas para diferentes valores de vedação.	128
Tabela 9 – Comparativo de custos para produção de amostras de metamateriais circulares com diâmetro de 107 mm.	131
Tabela 10 – Comparativo de custos para produção de amostras de metamateriais quadrados com dimensão de 160 mm x 160 mm.	131

Lista de abreviaturas e siglas

ABS: Acrylonitrile Butadiene Styrene

CEP: Controle Estatístico de Processos

CNC: Controle Numérico por Computador

DNG: Duplo Negativo

DPS: Duplo Positivo

ENG: Épsilon-Negativo

ISO: *International Organization for Standardization*

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LIC: Limite Inferior de Controle

LSC: Limite Superior de Controle

LVA: Laboratório de Vibrações e Acústica

MDF: Medium Density Fiberboard

MEF: Método de Elementos Finitos

MMA: Metamaterial acústico

MNG: Mu negativo

Nd: Neodímio

NPS: Nível de Pressão Sonora

POP: Procedimento Operacional Padrão

PT: Perda de Transmissão

R&R: Repetibilidade e Reprodutibilidade

RR: Refinamento Regular

SLS: Dividir o Lado mais Longo

YAG: Ítrio-Alumínio-Granada)

Lista de símbolos

A	Área da célula unitária	$[m^2]$
a	Largura do interior do metamaterial	$[m]$
b_0	Espessura das paredes do metamaterial	$[m]$
C	Capacitância	$[F]$
C_{HR1}	Capacitância do primeiro ressonador	$[F]$
C_{HR2}	Capacitância do segundo ressonador	$[F]$
c_0	Velocidade do som	$[m.s^{-1}]$
C_P	Calor específico a pressão constante	$[J.Kg^{-1}.K^{-1}]$
C_V	Calor específico a volume constante	$[J.Kg^{-1}.K^{-1}]$
D	Comprimento da estrutura	$[m]$
d	Diâmetro da perfuração circular	$[m]$
h	Altura do interior do metamaterial	$[m]$
H	Indutância	$[H]$
H_{HR1}	Indutância do primeiro ressonador	$[H]$
H_{HR2}	Indutância do segundo ressonador	$[H]$
L	Comprimento do interior do metamaterial	$[m]$
l_1	Comprimento do pescoço do primeiro ressonador	$[m]$
l_2	Comprimento do pescoço do segundo ressonador	$[m]$
L_{ef}	Comprimento efetivo de propagação interno	$[m]$
l_p	Espessura do painel	$[m]$
L_r	Comprimento do pescoço do ressonador	$[m]$
m	Largura total do metamaterial	$[m]$
m_{ef}	Massa efetiva	$[Kg]$
m_{est}	Massa estática	$[Kg]$

m_p	Massa por unidade de painel	$[kg.m^{-2}]$
n	Índice de refração	[Adimensional]
N	Número de perfurações	[Adimensional]
P_0	Pressão atmosférica	$[Pa]$
S	Área da seção transversal da abertura	$[m^2]$
S_1	Área da seção transversal da primeira estrutura	$[m^2]$
S_2	Área da seção transversal da segunda estrutura	$[m^2]$
t	Espessura do painel perfurado	$[m]$
V	Volume do ressonador	$[m^3]$
V_{celula}	Volume da célula unitária	$[m^3]$
V_1	Volume da primeira estrutura	$[m^3]$
V_2	Relação entre a rigidez da mola k_2 e k_1	$[m^3]$
V_2	Volume da segunda estrutura	$[m^3]$
w	Altura do interior do espaço enrolado	$[m]$
Z_0	Impedância acústica do ar	$[Pa.s.m^{-1}]$
Z_c	Impedância da cavidade enrolada	$[Pa.s.m^{-1}]$
Z_p	Impedância da perfuração	$[Pa.s.m^{-1}]$
Z_s	Impedância de superfície do metamaterial	$[Pa.s.m^{-1}]$

Letras gregas

α	Coefficiente de absorção sonora	[Adimensional]
\bar{r}	Raio hidráulico	$[m^2.m^{-1}]$
ΔL_r	Fator de correção devido ao tipo de pescoço	$[m]$
δ_1	Relação entre a rigidez da mola k_2 e k_1	[Adimensional]
δ_1	Relação entre a rigidez da mola k_2 e k_1	$[Kg]$
η	Viscosidade dinâmica	$[Pa.s]$
η_{ar}	Viscosidade dinâmica do ar	$[Pa.s]$
Γ	Constante de perfuração	[adimensional]
γ	Razão do calor específico	[adimensional]
κ	Condutividade térmica	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
μ	Permeabilidade magnética	$[N.A^{-2}]$
μ_w	Média	[Adimensional]
ν'	Constante	[Adimensional]
ν	Viscosidade cinemática do ar	$[m^2.s^{-1}]$
ω_2	Ressonância local da massa interna	$[rad.s^{-1}]$
ω	Frequência de ressonância	$[rad.s^{-1}]$
ρ_0	Densidade do ar	$[kg.m^{-3}]$
σ	Constante de perfuração para fenda	[Adimensional]
σ_w	Desvio padrão	[Adimensional]
Θ	Porosidade do painel perfurado	[Adimensional]
θ_1	Relação entre a massa m_2 e a massa central	[Adimensional]
θ_3	Relação entre a massa m_2 e a massa externa m_3	[Adimensional]
\tilde{k}_{eq}	Constante efetiva de propagação do canal	$[m^{-1}]$
ε	Permissividade elétrica	$[F.m^{-1}]$

ε_0	Permissividade elétrica do ar	$[F.m^{-1}]$
ε_r	Permissividade elétrica relativa	$[F.m^{-1}]$

Sumário

1	INTRODUÇÃO	26
1.1	Preâmbulo	29
1.2	Identificação dos objetivos	31
1.2.1	Objetivo geral	31
1.2.2	Objetivos específicos	31
2	REVISÃO DA LITERATURA	32
2.1	Absorção Sonora em Superfícies e Materiais	32
2.1.1	Tipos de absorvedores sonoros	32
2.1.1.1	Absorvedores porosos	32
2.1.1.2	Ressonadores	33
2.1.1.2.1	Helmholtz	33
2.1.1.2.2	Membrana	34
2.1.1.2.3	Microperfurado	35
2.1.2	Ruído em baixas frequências	36
2.2	Metamaterial	37
2.2.1	Metamaterial eletromagnético	38
2.2.2	Metamaterial acústico	38
2.2.2.1	Massa efetiva negativa	39
2.2.2.2	Módulo de volume efetivo negativo	41
2.3	Modelo analítico de uma metamaterial acústico do tipo espaço enrolado	42
2.3.1	Absorção sonora	43
2.3.2	Cavidades	44
2.3.3	Perfuração do tipo circular (modelo de painel perfurado)	45
2.3.4	Perfuração do tipo quadrada (modelo de fluido equivalente)	45
2.3.5	Perfuração do tipo fenda (modelo de Maa)	47
2.4	Técnica de fabricação com corte laser	48
2.4.1	Laser de CO ₂	49
2.4.2	Laser de Nd:YAG	50
2.4.3	Laser de fibra	51
2.5	Controle Estatístico de Processo	52
2.5.1	Cartas de controle	53
2.5.2	Teste de normalidade	54
2.5.3	Análise de capacidade	55

2.5.4	Aplicações do CEP para solução de problemas	56
3	METODOLOGIA	58
3.1	Revisão bibliográfica	58
3.2	Modelos analíticos dos MMA	59
3.3	Modelo numérico do metamaterial selecionado	59
3.3.1	Cavidade simples	62
3.3.2	Cavidades compostas	63
3.3.3	Amostra completa	65
3.4	Projeto e montagem das amostras	67
3.4.1	Caracterização do metamaterial acústico	67
3.4.2	Controle preliminar do processo de manufatura	68
3.4.3	Corte e montagem das amostras	71
3.5	Ensaio no tubo de impedância	73
3.6	Equipamentos e programas computacionais	76
3.7	Variação das amostras devido ao processo produtivo	76
4	INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR DAS CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS	79
4.1	Avaliação da absorção sonora dos elementos construtivos	79
4.2	Investigação da absorção no interior das cavidades	81
4.2.1	Impedância superficial	81
4.2.2	Impedância adicional no interior de um ressonador	82
4.2.3	Geometria n=1 - Fenda (0,6 x 5,9 x 2,9)	84
4.2.4	Geometria n=1 - Fenda (1,2 x 5,9 x 2,9)	84
4.2.5	Investigação da absorção adicional no interior do ressonador	85
4.2.5.1	Cavidade espaço enrolado paralelo n=5	86
4.2.5.2	Cavidade espaço enrolado n=2	87
4.2.5.2.1	Construção em MDF	87
4.2.5.2.2	Amostras com cola adicional entre as camadas	87
4.3	Fator de correção em razão da área útil da amostra	89
4.3.1	Área de aproveitamento da amostra	89
4.3.2	Fator de aproveitamento da amostra	90
4.3.3	Efeito da área de aproveitamento	91
4.3.4	Proposta de implementação do fator de aproveitamento	94
4.3.5	Validação do fator de aproveitamento	95
4.4	Avaliação da efetividade do anel de vedação no desempenho das amostras	99
4.5	Síntese do capítulo	100

5	APLICANDO O CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO . . .	102
5.1	Amostra para o estudo estatístico	102
5.2	Avaliação da absorção sonora dos elementos construtivos	103
5.3	Cartas de controle	105
5.4	Teste de normalidade e análise de capacidade	106
5.5	Ajuste dos valores	108
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	111
6.1	Diferentes materiais	112
6.2	Comparativo da influência do enrolamento	113
6.3	Comparativo entre perfurações	117
6.4	Banda larga	121
6.5	Vazamento da amostra	126
6.6	Análise de sensibilidade	129
6.7	Viabilidade financeira da técnica	130
6.8	Ensaio experimentais realizados	132
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	134
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	136
	REFERÊNCIAS	137
	APÊNDICE A – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	145
A.1	Análise de sensibilidade dos modelos de MMA	145
A.1.1	Perfuração	145
A.1.2	Cavidade	146
A.1.3	Síntese da análise de sensibilidade	147
	APÊNDICE B – IMAGENS ADICIONAIS	149
B.1	Construção amostras	149
B.2	Procedimento experimental	150
	APÊNDICE C – RESULTADOS SEM CORREÇÕES	151
	APÊNDICE D – RESULTADOS ADICIONAIS	155
D.1	Diferentes enrolamentos	155
D.2	Pico de absorção em 350 Hz	157
D.3	Investigação numérica da dissipação termo-viscosa	158

1 Introdução

A evolução da sociedade sempre esteve relacionada a tecnologia, portanto também relacionada aos materiais. Este fato ocorre desde o início da civilização humana, materiais como a cerâmica resultaram na fabricação de vasos impermeáveis e possibilitou a estocagem de alimentos colhidos pelas primeiras civilizações sedentárias, ocorrido no oitavo milênio antes da era comum. O surgimento dos tijolos ocorreu na sequência e permitiu a revolução na maneira de construir abrigos, conseqüentemente o início da arquitetura e engenharia civil. O domínio dos metais preciosos possibilitou a criação de moedas e o início do conceito de dinheiro, superando a prática do escambo, ocorrido junto a escrita, cerca de 3.000 A.C. O manuseio de outros metais como ferro e bronze possibilitaram a fabricação de armas e ferramentas (PETKOVSKA; CVETKOVSKI, 2021).

Séculos mais tarde na Inglaterra, por volta de 1760, o domínio de todos os materiais desenvolvidos até aquele instante permitiu o início da revolução industrial, a partir de metais, máquinas nasciam, carvão era consumido e ruído gerado. A sociedade começou a se organizar em grandes cidades próximo das fábricas, comportamento mantido até a atualidade.

Novos elementos derivados do petróleo e materiais como plásticos e compósitos proporcionou o nascimento de novos meios de transporte como os carros e aviões, resultando no encurtamento das distâncias entre cidades e países, contudo também criou fontes de ruído que se movimentam, capazes de gerar incômodo na terra, céu e mar.

Em quase todos os ambientes, o som ouvido é composto por uma componente que surge diretamente da fonte e outra de reflexões originadas de objetos e superfícies. O físico norte-americano Wallace C. Sabine fundou a mais de um século a acústica arquitetônica, desde então existe um interesse considerável no estudo da absorção superficial e em como manipular as reflexões sonoras, além de como o som é percebido pela orelha humana. Nas últimas décadas muitos projetos de absorvedores sonoros foram desenvolvidos e as técnicas de medições foram aprimoradas. Quando o interesse é o controle de ruído, o objetivo está na redução da energia, já para acústica arquitetônica, o foco está na distribuição espacial uniforme do som (COX; D'ANTONIO, 2016).

Uma fonte sonora produz dois campos sonoros em ambientes internos: o primeiro é o campo sonoro direto divergindo da fonte, o segundo é o campo sonoro reverberante. Para ambientes industriais, onde normalmente existem problemas de ventilação, refrigeração, manutenção, acesso de materiais e pessoal, é possível reduzir o NPS (Nível de Pressão Sonora) do campo reverberante adicionando materiais absorvedores nas superfícies do ambiente, já o NPS originado pelo campo acústico direto não é modificado com a utili-

zação de absorvedores, para conseguir reduzir o ruído pode ser necessário a adoção de enclausuramento ou outros tratamentos locais. A utilização de materiais absorvedores em ambientes internos altera e melhora as características acústicas internas como o aumento da inteligibilidade e a redução da reverberação (GERGES, 2000).

Os materiais acústicos convencionais normalmente são estruturas porosas com tamanho de poros da ordem de milímetros ou micrômetros. Isso permite a ocorrência da absorção por atrito viscoso entre as paredes da estrutura e as moléculas de ar movimentadas pela onda sonora. Contudo, outros fenômenos também agem nesses materiais como as trocas térmicas, em menor medida, resultando em dissipação da energia acústica (INGARD, 2009; JACOBSEN *et al.*, 2011).

A redução do ruído é um grande desafio da atual sociedade. Indústrias de todos os segmentos usam algum tipo de solução acústica, contudo geralmente sofrem pela falta de eficiência, principalmente em baixas frequências. Isso ocorre devido às propriedades físicas das atuais soluções disponíveis, as quais exigem grandes massas ou espessuras para cumprir seu objetivo em baixas frequências, nesse contexto o interesse tem crescido pelo estudo e desenvolvimento de novas soluções acústicas (ROMERO-GARCIA; HLADKY-HENNION, 2019).

Nos anos 60 o físico Russo Veselago (1967) publicou em seu trabalho o início dos conceitos que levaria aos metamateriais, o autor propôs a existência de um material eletromagnético simultaneamente com permissividade (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) negativas, caracterizado por um índice de refração negativo, tal material não existe na natureza, contudo teoricamente possível de ser construído (CRASTER; GUENNEAU, 2012; BIES; HANSEN; HOWARD, 2017; GAN, 2018).

Nos anos posteriores o conceito dos metamateriais foi explorado e propostas para aplicações em outras áreas começaram a ser publicadas por diversos autores, como o caso de Pendry (2000) que em seu trabalho propôs a construção de uma lente perfeita baseada na utilização de um material com índice de refração negativo. O atual progresso dos metamateriais só foi possível pelo avanço de tecnologias em modelagem e nanofabricação, essas áreas são componentes chaves no entendimento e evolução dos metamateriais modernos (DIEST, 2013).

Em vários casos estes materiais são capazes de substituir os tradicionais tratamentos acústicos utilizados na prática, em virtude dos melhores desempenhos em frequências específicas não atingido pelos materiais disponíveis no mercado, além de possuírem menores dimensões. Recentemente várias soluções baseadas nestes sistemas têm sido usadas para criar difusores ou absorvedores eficientes que são, ao mesmo tempo, eficientes em baixas frequências e com dimensões abaixo do comprimento de onda (ROMERO-GARCIA; HLADKY-HENNION, 2019).

O desenvolvimento de técnicas modernas de fabricação vem permitindo que estruturas baseadas em metamateriais deixem os ambientes puramente virtuais e passem a existir no mundo real. As impressoras 3D ganharam muita popularidade nas últimas décadas, estes equipamentos são capazes de construir objetos depositando diferentes materiais nas três dimensões. Desse modo, metamateriais acústicos (MMA) podem ser materializados e ensaiados em laboratório, ou até mesmo, com o aumento da escala de produção, permitir a viabilidade da utilização destas soluções pela população em geral (PETKOVSKA; CVETKOVSKI, 2021).

A técnica construtiva de impressão 3D geralmente inicia-se a partir do vazio e o objeto é desenvolvido ao depositar material sobre uma base de construção. Entretanto, os métodos de fabricação mais comuns são do tipo subtrativo, desse modo ao final da construção de um objeto de madeira, por exemplo, têm-se restos de serragem (HORVATH; CAMERON, 2014).

Contudo, há desvantagens na atual tecnologia utilizada para impressão 3D, principalmente no método de Modelagem de Deposição Fundida utilizando plástico ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), pode ser destacado os limites com a velocidade de construção de amostras, precisão e densidade do material. Existem máquinas capazes de criar materiais com maior precisão, contudo além de mais caras, geralmente exigem maior tempo para construção das amostras, a tecnologia não permite que uma máquina seja, ao mesmo tempo, precisa e rápida. Por fim, como os bicos de injeção de material possuem seção transversal circulares, existem limitações quanto aos tipos de geometrias construídas, principalmente em pequenas dimensões, também as arestas e cantos internos apresentam arredondamento, além da impossibilidade de construção de cantos externos afiados (GIBSON *et al.*, 2021).

Uma solução existente para fabricação de materiais com alta precisão é com utilização do LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), quando focalizado o feixe de laser é uma das mais intensa fonte de energia, capaz de vaporizar grande parte dos materiais conhecidos. Para processamento de materiais o laser vem sendo usado cada vez mais, por unir qualidade e velocidade nos processos que faz parte. Uma utilização principal desta tecnologia é no corte de materiais, neste processo um feixe de laser muito pequeno é usado para vaporizar parte do material, dividindo a estrutura (POWELL, 1993).

O primeiro feixe de laser foi operado em 1960, pelo físico estadunidense Theodore Maiman, desde então centenas de variantes foram desenvolvidas e otimizadas para diversas aplicações, desde medições, cortes de materiais até equipamentos médicos. Em todas as utilizações existem algumas propriedades físicas que tornam esta tecnologia versátil, como a propagação retilínea do feixe de luz e a interação com a matéria (GUO; SINGH, 2021).

O processo de laser para corte enquadra-se na técnica de construção subtrativa,

a partir de uma chapa de matéria-prima, o projeto virtual se materializa, camada por camada, deste modo existem limitações, principalmente relacionadas com as espessuras da chapa a ser cortada, contudo, quando superadas, os ganhos com aumento considerável na velocidade de produção e redução do custo de fabricação vislumbra a possibilidade da fabricação de metamateriais acústicos com baixo custo e alta qualidade, permitindo que estas soluções sejam utilizadas em ambientes diferentes dos centros de pesquisas, por pessoas comuns.

Desta forma, baseado no que foi percorrido, tem-se como motivação para este trabalho, a possibilidade de estudar e desenvolver o método de fabricação de metamateriais acústicos baseados na técnica do corte a laser com posterior montagem das amostras por justaposição das camadas, reduzindo os custos de fabricação e facilitando o aumento da escala de produção.

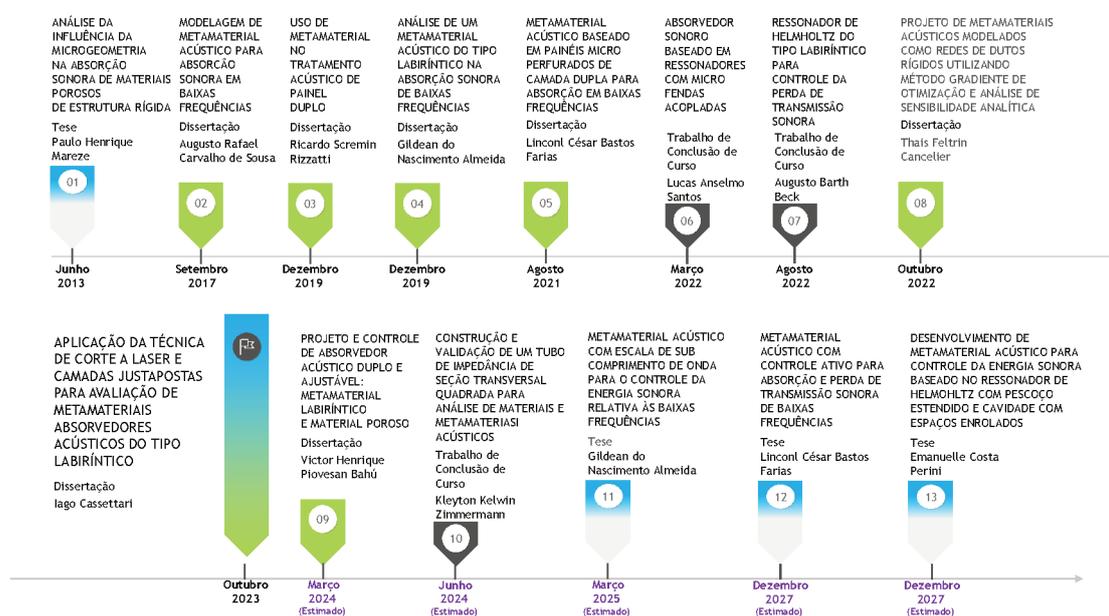
1.1 Preâmbulo

O grupo de metamateriais acústicos, ao qual este trabalho faz parte do projeto de pesquisa intitulado "Metamateriais acústicos: controle e otimização da absorção e atenuação sonora", é coordenado pelo Professor Erasmo Felipe Vergara, foi iniciado em 2019, e atualmente são 12 o número de alunos que fazem parte do grupo, entre eles possuem no nível de Iniciação Científica, Mestrado e Doutorado. A Figura 1 organiza de maneira cronológica as publicações dos trabalhos de conclusão em diferentes níveis dos estudantes do grupo e de outros alunos do LVA que também desenvolveram suas pesquisas em metamateriais acústicos.

O panorama abordado nas pesquisas anteriores estabeleceu as bases fundamentais para a evolução do estudo em questão. O trabalho desenvolvido por Mareze (2013), desempenhou um papel crucial ao pavimentar o caminho para as investigações no campo dos metamateriais, permitindo uma análise aprofundada das características de absorção sonora. Além disso, sua contribuição significativa foi evidenciada na aplicação de modelos que envolviam uma matriz de transferência, utilizada para estimar a absorção acústica de diversos materiais. A exploração da dissipação viscotérmica e a consideração de materiais com ressonâncias internas representaram avanços notáveis. O resultado dessas investigações não apenas consolidou o entendimento acerca das propriedades dos metamateriais, mas também serviu como alicerce para o desenvolvimento de novos estudos específicos nesse domínio.

Os estudos subsequentes, abordados nos trabalhos de Sousa (2017) e Rizzatti (2019), deram continuidade ao progresso iniciado, concentrando-se na análise e implementação de soluções acústicas baseadas em metamateriais na indústria aeronáutica. A utilização de geometrias construídas e projetadas por meio da impressão 3D, aliada aos testes conduzidos

Figura 1 – Linha do tempo dos trabalhos de conclusão de graduação e pós-graduação de pesquisas de metamateriais acústicos do LVA da UFSC.



Fonte: O autor.

com o tubo de impedância, destacou a aplicabilidade prática desses materiais inovadores para absorção sonora em baixa frequência.

Prosseguindo, os trabalhos de Almeida (2019), Farias (2021), Santos (2022) e Beck (2022) expandiram o escopo de pesquisa ao explorar modelos específicos de metamateriais absorvedores acústicos, focados para aplicações de acústica de salas em baixas frequências. O trabalho de Almeida (2019) focou na construção de um modelo do tipo espaço enrolado, baseando-se em uma geometria previamente estabelecida. Os autores Farias (2021), Santos (2022) e Beck (2022), fundamentados em um modelo semelhante, empreenderam a fabricação utilizando a tecnologia de impressão 3D, submetendo os materiais a testes meticulosos no tubo de impedância. Enquanto o trabalho de Farias (2021) se dedicou à concepção de um absorvedor do tipo Honeycomb, visando absorção de baixa frequência, os trabalhos de Santos (2022) e Beck (2022) valendo-se de um ressonador de Helmholtz e um modelo labiríntico, exploraram respectivamente a absorção sonora e a perda de transmissão sonora.

Na sequência, o trabalho de Almeida (2019) estudou um modelo de metamaterial absorvedor acústico do tipo espaço enrolado, utilizando um arranjo geométrico previamente descrito na bibliografia. Fabricado por meio de impressão 3D, o modelo incorporou dois espaços enrolados, ampliando a compreensão e a aplicabilidade desses materiais. Farias (2021), seguindo a mesma abordagem de fabricação, conduziu experimentos no tubo de impedância para explorar absorvedores acústicos do tipo Honeycomb. Essa continuidade na técnica de manufatura proporcionou uma análise experimental consistente, destacando

a eficácia desses absorvedores, especialmente em frequências mais baixas. Por sua vez, Beck (2022) explorou a perda de transmissão sonora em geometrias fabricadas com impressão 3D. Essa abordagem, complementar aos estudos anteriores, ampliou a compreensão das propriedades acústicas dessas geometrias específicas, reforçando a versatilidade da impressão 3D na criação de estruturas destinadas à atenuação da transmissão sonora.

Com base nas pesquisas anteriores, o presente estudo foi concebido com a finalidade de implementar um modelo de metamaterial absorvedor acústico, utilizando uma técnica de fabricação com corte a laser, pouco explorada para manufatura de metamateriais acústicos. Esta abordagem permitiu a construção eficaz de metamateriais do tipo espaço enrolado, com níveis de qualidade comparáveis, ao mesmo tempo, em que proporcionava significativa redução nos custos e no tempo de fabricação. Este avanço representa a continuidade lógica das pesquisas anteriores, consolidando-se como uma contribuição substancial para o campo emergente dos metamateriais aplicados à absorção acústica.

1.2 Identificação dos objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em propor e aplicar a técnica de fabricação a laser na construção e montagem por camadas justapostas de metamateriais absorvedores acústicos. Desta forma, o presente trabalho fornecerá uma perspectiva que permita a confecção em escala de absorvedores que atuem de forma eficiente na região das baixas frequências (100 - 800 Hz).

1.2.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos servirão de base para alcançar os objetivos gerais:

- Verificar o desempenho acústico dos metamateriais acústicos fabricados com diferentes materiais construtivos, entre eles MDF (Medium Density Fiberboard) e acrílico;
- Avaliar comparativamente o comportamento acústico dos metamateriais por meio de ensaios em tubo de impedância, por simulação computacional e modelos teóricos;
- Propor metamateriais eficientes nas baixas frequências permitindo o controle das frequências de pico, amplitude de absorção sonora e largura de banda;
- Validar estatisticamente os resultados de absorção sonora de absorvedores do tipo espaço enrolado construídos com a técnica de corte a laser e camadas justapostas.

2 Revisão da Literatura

2.1 Absorção Sonora em Superfícies e Materiais

A lei da conservação da energia afirma que esta grandeza não pode ser criada nem destruído. Para reduzir o som em um ambiente, a energia não pode ser eliminada, no entanto, pode ser alterada em outra forma, como o calor. Este é o papel dos absorvedores sonoros (EVEREST; POHLMANN, 2022).

Para o estudo em uma sala, não importa se a absorção de uma parede é fisicamente provocada por processos dissipativos, ou por partes da energia que penetram através da parede no espaço exterior. Desse modo, uma janela aberta é muito eficaz em absorver o som, ao atuar como um sumidouro para toda a energia sonora incidente (KUTTRUFF, 2016).

Cada material com o qual uma onda sonora interage absorve alguma energia. A medida mais comum para a quantidade de som absorvido por um determinado material é o coeficiente de absorção, normalmente representado pela letra grega alfa. O coeficiente de absorção é a razão entre a energia sonora absorvida e a incidente, possuindo variação conforme a frequência sonora. Para os materiais absorvedores porosos, o coeficiente de absorção aumenta com a frequência analisada (ROSSING, 2014).

2.1.1 Tipos de absorvedores sonoros

Existem diversas estruturas capazes de dissipar a energia sonora. Estes elementos possuem como uma de suas diferenças a faixa de atuação. Os absorvedores mais comuns são os porosos, estes têm sua faixa de atuação em altas frequências. Já os absorvedores do tipo ressonadores podem ser projetados para atuarem em frequências mais baixas. Os absorvedores de painéis microperfurados geralmente atuam em frequências intermediárias, podendo ser utilizados em conjunto com absorvedores porosos para, assim, operar em uma banda mais larga de absorção. Todos esses tipos de absorvedores operam fundamentalmente da mesma maneira. O som é a energia vibratória das partículas de ar, usando estes elementos, é possível transformar o som em calor. Desse modo, a energia sonora é reduzida (EVEREST; POHLMANN, 2022).

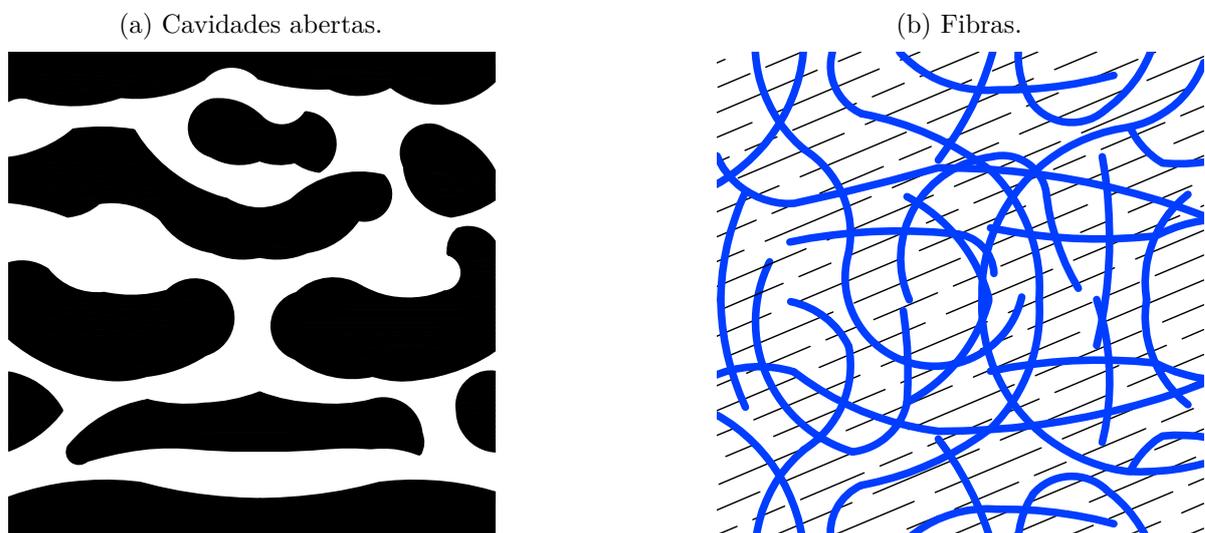
2.1.1.1 Absorvedores porosos

O mecanismo mais importante de absorção sonora em materiais porosos é devido à viscosidade. Os materiais absorvedores geralmente são estruturas nas quais o tamanho dos poros é bastante pequeno, tipicamente da ordem de alguns milésimos de polegada.

Os materiais porosos são caracterizados por terem uma estrutura aberta acessível pelo ar, desse modo as moléculas movimentadas pela onda sonora podem ser pressionadas no interior do material, transformando a energia da onda sonora em energia térmica (JACOBSEN *et al.*, 2011; INGARD, 2009; MAA, 2000).

Grande parte dos materiais absorvedores de som são porosos, como demonstrado na Figura 2. Geralmente estes materiais não resistem bem aos efeitos da chuva, vento e ambientes tóxicos. Os elementos particulados existentes em ambientes externos, principalmente em ambientes urbanos com alta poluição atmosférica, podem facilmente obstruir os poros, reduzindo significativamente o desempenho a longo prazo destes materiais (COX; D'ANTONIO, 2016).

Figura 2 – Absorvedores porosos.



Fonte: Adaptado de Cox e d'Antonio (2016), Kuttruff (2016).

Apesar de desempenharem com qualidade a função de absorvedores acústicos, principalmente para altas frequências, os materiais porosos podem acumular e soltar partículas existentes no ar, característica que prejudica seu uso em ambientes como indústria alimentícia e hospitais (COBO, 2021).

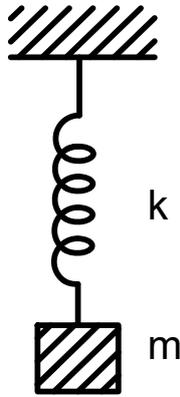
2.1.1.2 Ressonadores

2.1.1.2.1 Helmholtz

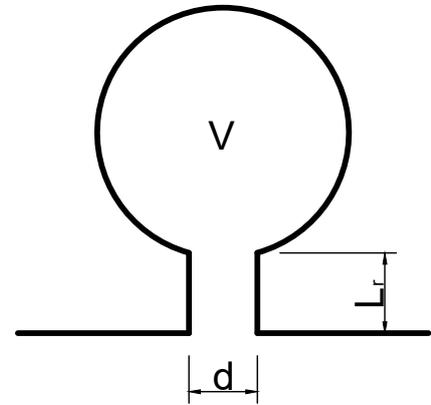
Absorvedores ressonantes tem como principio de funcionamento uma massa vibrando contra uma mola (ver Figura 3a). No caso de um absorvedor de Helmholtz, a massa é uma quantidade de ar acumulada no pescoço do ressonador, o montante de ar no interior do volume funciona como mola (ver Figura 3b). Para transformar isso em um absorvedor, as perdas são fornecidas pelo amortecimento interno (COX; D'ANTONIO, 2016; KUTTRUFF, 2016; HOPKINS, 2012).

Figura 3 – Absorvedor acústico do tipo ressonador.

(a) Sistema massa mola.



(b) Ressonador de Helmholtz.



Fonte: Adaptado de Jacobsen *et al.* (2011), Kuttruff (2016), Everest e Pohlmann (2022).

Estes dispositivos são amplamente utilizados para obter absorção em frequências de som mais baixas. O ar na cavidade é elástico, e a massa de ar no gargalo da garrafa reage com essa elasticidade para formar um sistema ressonante, como um peso em uma mola vibrando em seu período natural. A absorção é máxima na frequência de ressonância e diminui em frequências próximas. A frequência de ressonância de um ressonador de Helmholtz com abertura quadrada é dada por:

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(L_r + \Delta L_r)}}, \quad (2.1)$$

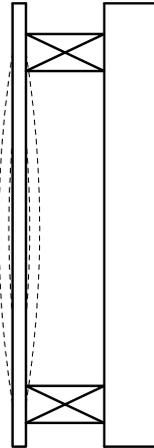
onde c_0 representa a velocidade do som, S a área da seção transversal da abertura, V o volume do ressonador, L_r o comprimento do pescoço e ΔL_r o fator de correção devido ao tipo de pescoço (EVEREST; POHLMANN, 2022; HOPKINS, 2012; INGARD, 2009).

A mudança no volume da cavidade de ar, no comprimento ou diâmetro do pescoço, altera frequência de ressonância. A largura da banda de absorção depende do atrito do sistema. Adicionando um pouco de material absorvedor no interior de um ressonador, pode-se reduzir a amplitude e aumentar a largura da banda de absorção (EVEREST; POHLMANN, 2022).

2.1.1.2.2 Membrana

Um absorvedor de membrana, conforme demonstrado na Figura 4, consiste em uma folha ou painel não poroso com massa, montado na frente de uma parede rígida a uma certa distância. Estes dispositivos usam o ar dentro de uma cavidade para atuar como uma mola (JACOBSEN *et al.*, 2011; KUTTRUFF, 2016; COX; D'ANTONIO, 2016).

Figura 4 – Absorvedores do tipo membrana.



Fonte: Adaptado de Everest e Pohlmann (2022), Rossing (2014), Kuttruff (2016), Barron (2009).

A massa do painel e a elasticidade do ar na cavidade são ressonantes em uma determinada frequência. Sob a influência de uma onda sonora incidente, ele realizará vibrações, cuja amplitude depende fortemente da frequência do som. A frequência, a qual o painel absorvedor possui o maior desempenho, pode ser calculada utilizando a Equação 2.2:

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0}{m_p l_p}}, \quad (2.2)$$

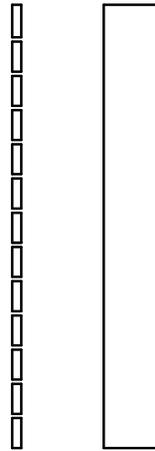
onde ρ_0 é a densidade do ar, c_0 a velocidade do som no ar, m_p a massa por unidade de painel e l_p a espessura do painel (KUTTRUFF, 2016; EVEREST; POHLMANN, 2022; JACOBSEN *et al.*, 2011).

2.1.1.2.3 Microperfurado

Painéis microperfurados funcionam como uma série de ressonadores de Helmholtz acoplados. Estas estruturas podem ser construídas utilizando materiais que normalmente não são eficazes como absorvedores sonoros, como alumínio, madeira ou aço. Uma estrutura de painel microperfurado é demonstrada na Figura 5. A absorção sonora é devido às perdas viscosas no momento em que o ar passa pelas microperfurações, pouco maiores que a camada limite (EVEREST; POHLMANN, 2022; COX; D'ANTONIO, 2016).

O amortecimento originado no interior dos orifícios, elimina a necessidade da utilização de materiais porosos. Desse modo, estes absorvedores podem ser usados em situações onde há preocupações sobre contaminação bacteriana em indústrias alimentícias e farmacêuticas, também em indústrias microeletrônicas ou silenciadores de sistemas de ventilação, onde a contaminação da fibra é um problema. Feitos com o correto material, os absorvedores microperfurados podem ser mais robustos do que os absorventes porosos

Figura 5 – Absorvedores do tipo microperfurado.



Fonte: Adaptado de Everest e Pohlmann (2022), Rossing (2014), Kuttruff (2016), Barron (2009).

em ambientes agressivos. Eles também são menos suscetíveis a entupimento mesmo em ambientes muito empoeirados (COX; D'ANTONIO, 2016).

2.1.2 Ruído em baixas frequências

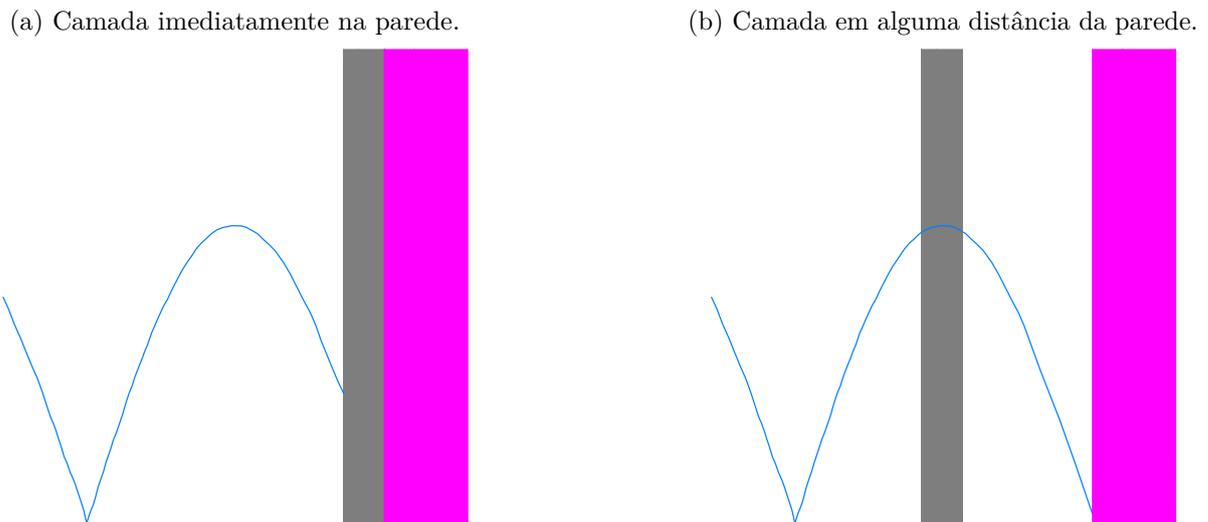
O controle modal de baixa frequência exigem que tanto difusores quanto absorvedores porosos possuam profundidade elevada para operar, entretanto, geralmente esta é uma dimensão limitada para aplicações práticas, devido à restrição de custo e espaço. Desse modo, soluções que necessitam de menos espaço para operação são mais frequentemente usadas (COX; D'ANTONIO, 2016). O termo "bass trap" caracteriza vários tipos de absorvedores de som de baixa frequência, entre eles absorvedores de painel, esta é uma solução utilizada com frequência em salas de controle de estúdio de gravação para controlar ondas estacionárias (EVEREST; POHLMANN, 2022).

Os coeficientes de absorção de grande parte dos materiais porosos diminuem com a redução da frequência, desse modo estes materiais não são muito eficazes em frequências baixas quando comparado com o desempenho em frequências mais altas. A absorção sonora em baixa frequência dos materiais porosos tem relação direta com a espessura destes materiais, até um valor crítico, a partir do qual o incremento da espessura não resulta em aumento de absorção. Para o material criar uma absorção significativa é necessário ser colocado onde a velocidade das partículas é alta. Perto de superfícies sólidas, como paredes, a velocidade é geralmente nula, deste modo desempenham baixa absorção acústica (ROSSING, 2014; COX; D'ANTONIO, 2016).

Ondas sonoras alcançam seu primeiro máximo de velocidade de partícula na distância equivalente a $1/4$ do comprimento de onda. Desse modo, quanto menor a frequência, maior a distância. A eficácia do absorvedor pode ser elevada ao acrescentar uma camada de ar entre a superfície rígida e o material poroso (ver Figura 6). Com

isso, a espessura de material absorvedor consegue operar em frequências mais baixas, ou seja, onde existe velocidade de partícula máxima para menores frequências (maiores comprimentos de onda) (ALLARD; ATALLA, 2009; KUTTRUFF, 2016; JACOBSEN *et al.*, 2011).

Figura 6 – Camada porosa em frente a uma parede rígida.



Fonte: Adaptada de Kuttruff (2016).

Por outro lado, é possível obter alto desempenho em baixas frequências explorando alguns fenômenos físicos como a ressonância. Desse modo não é necessário grandes dimensões para desempenhar com eficácia a absorção sonora. O desempenho pode ser obtido ao pendurar uma folha em frente a um absorvedor poroso, formando um absorvedor de Helmholtz, também pode usar uma folha fina que vibra e cria uma membrana ou painel absorvente (COX; D'ANTONIO, 2016).

2.2 Metamaterial

As descobertas teóricas propostas por Veselago (1967) são consideradas um dos pilares do campo dos metamateriais, o autor descreveu teoricamente materiais com permissividade efetiva negativa (ϵ) e permeabilidade (μ), que criam um índice de refração negativo e provou que tais materiais hipotéticos poderiam transmitir ondas com velocidade de fase contrária à propagação de ondas em materiais convencionais (YUNKER, 2012; ESFAHLANI; HUSSEIN, 2017).

O termo metamaterial criado em 1999 por Rodger M. Walser, da Universidade do Texas, foi originalmente definido como: "*Compósitos macroscópicos com uma arquitetura celular periódica, tridimensional e sintética projetada para produzir uma combinação otimizada, não disponível na natureza, de duas ou mais respostas a uma excitação específica*" (WEIGLHOFER; LAKHTAKIA, 2003, p.300).

2.2.1 Metamaterial eletromagnético

Normalmente as propriedades de um material eletromagnético podem ser caracterizadas pela permissividade elétrica (ε) e permeabilidade magnética (μ). A permissividade relativa e a permeabilidade relativa de um material podem ser obtidas ao comparar com os valores destas propriedades para o ar, tendo valores respectivamente de $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ e $\mu_r = \mu/\mu_0$, com isso é possível definir o parâmetro índice de refração como $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$. Na natureza a maioria dos materiais possuem índice de permeabilidade maiores que permissividade (CUI; SMITH; LIU, 2010).

A classificação dos materiais eletromagnéticos é demonstrada na Figura 7a, um material com permissividade e permeabilidade maior que zero ($\varepsilon > 0$ e $\mu > 0$) é definido como duplo positivo (DPS). A maioria dos materiais de ocorrência natural, como os dielétricos, enquadram-se nesta classificação. Existem também os materiais com $\varepsilon < 0$ e $\mu > 0$, designado como épsilon negativo (ENG), em alguns regimes de frequência muitos plasmas apresentam esta característica. Na sequência, um material com $\varepsilon > 0$ e $\mu < 0$ é classificado como mu negativo (MNG), materiais girotrópicos exibem esta característica em certos regimes de frequência. Por fim, materiais com $\varepsilon < 0$ e $\mu < 0$ são classificados como duplo negativo (DNG), até o momento este tipo de material só foi obtido com construções artificiais (ENGHETA; ZIOLKOWSKI, 2006; JIANG, 2012).

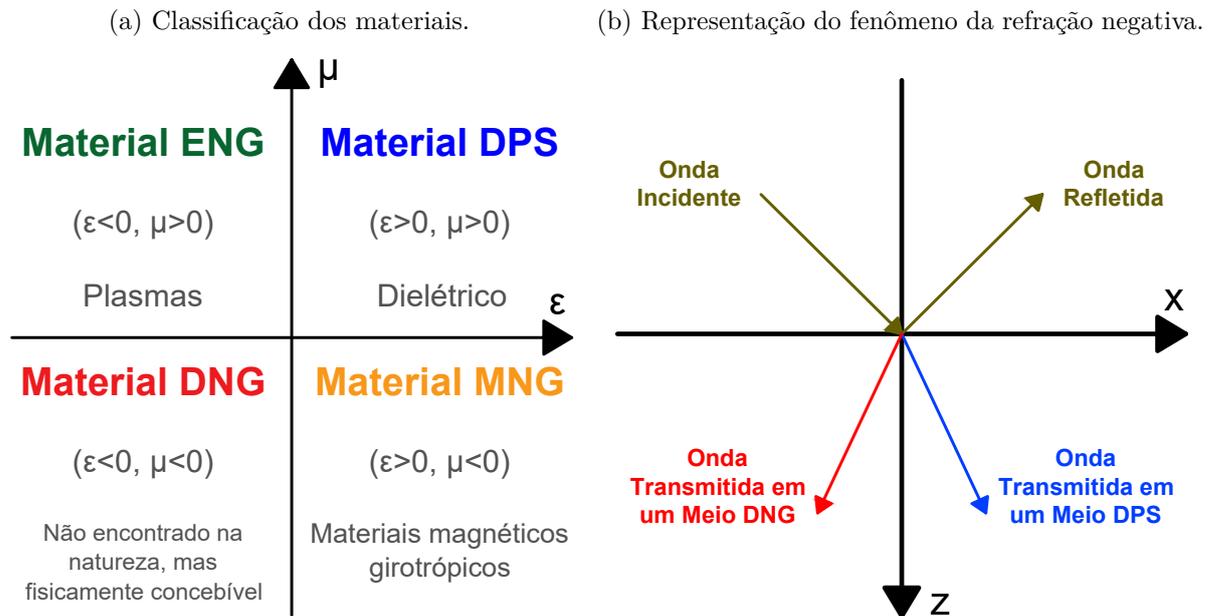
O fenômeno da refração negativa ocorre quando uma onda incide obliquamente em uma interface DPS-DNG, conforme mostrado na Figura 7b. Se o índice de refração de um meio for negativo, o ângulo refratado, conforme a lei de Snell, também deve se tornar “negativo”. Isso sugere que a refração é anômala e o ângulo refratado está do mesmo lado da interface normal que o ângulo incidente (ENGHETA; ZIOLKOWSKI, 2006; JIANG, 2012).

2.2.2 Metamaterial acústico

Os metamateriais acústicos são estruturas compósitas, projetadas e fabricadas pelo homem que apresentam novas propriedades acústicas em comparação com a matéria-prima utilizada na sua construção. Inspirado nos metamateriais eletromagnéticos, os metamateriais acústicos têm se mostrado uma maneira bem-sucedida para elevar o desempenho dos materiais em baixas frequências sem necessariamente precisar aumentar suas dimensões (ROMERO-GARCIA; HLADKY-HENNION, 2019).

Os estudos com cristais fonônicos foram responsáveis pelo início da ciência dos metamateriais acústicos, ocorrido durante a década de 1990. O trabalho de Liu *et al.* (2000) com metamateriais acústicos motivou diversos autores a estudarem novas soluções baseadas nestas soluções, permitindo a construção de estruturas com alta perda de transmissão e absorção sonora em baixas frequências próximas do máximo (GAN, 2018; HUSSEIN;

Figura 7 – Materiais eletromagnéticos



Fonte: Adaptada de Jiang (2012), Cui, Smith e Liu (2010), Engheta e Ziolkowski (2006), Capolino (2009).

LEAMY; RUZZENE, 2014).

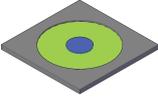
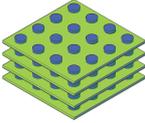
O Quadro 1 demonstra as principais classes de metamateriais acústicos sendo estudados atualmente com os respectivos objetivos e descrições. Dentro destas classes, existe uma infinidade de estruturas que podem ser geradas e aprimoradas para conseguir desempenho em faixas de frequências específicas.

Estruturas de metamateriais acústicos são desenvolvidas para atuarem em dois objetivos principais. O primeiro é a absorção sonora, consiste em dissipar a energia acústica incidente no material, o segundo é a Perda de Transmissão (PT) neste caso o material não deve permitir que a energia incidente em uma face seja transferida para a outra. Metamateriais acústicos são geralmente projetados para operarem em máxima eficácia em faixas de frequências muito específicas, fato originado pela necessidade de ressonâncias locais ao longo da estrutura. Esta característica pode ser contornada ao juntar materiais sintonizados em diferentes frequências, causando a ampliação da faixa de frequência efetiva da amostra. A eficácia dos metamateriais para atuar em frequências baixas, quando comparados com materiais convencionais, pode ser explicada pelos índices negativos de massa efetiva e módulo de volume efetivo que podem ser adquiridos por estas estruturas (DEYMIER, 2013; ROMERO-GARCIA; HLADKY-HENNION, 2019; LOVELOCK, 2014).

2.2.2.1 Massa efetiva negativa

Uma característica interessante de compósitos é que, diferente de corpos rígidos, seus componentes podem apresentar resposta inercial do sistema diferente do valor estático,

Quadro 1 – Classificação dos principais metamateriais acústicos.

Estrutura	Imagem	Objetivo	Descrição
Membrana		Perda de transmissão	Consiste em uma membrana tensionada, geralmente com espessura inferior a 1 mm, com uma ou diversas massas heterogêneas anexadas agindo como ressonadores. As bordas externas são fixas por uma estrutura relativamente rígida (DEYMIER, 2013; FANG <i>et al.</i> , 2006; PAI; HUANG, 2015; LANGFELDT; GLEINE, 2019; LANGFELDT <i>et al.</i> , 2016).
Placa		Perda de transmissão	São estruturas periódicas formadas por uma ou mais chapas acopladas a elementos com massa e rigidez distintos, deste modo causam ressonâncias locais (PAI; HUANG, 2015; LANGFELDT; GLEINE, 2019; ANG; KOH; LEE, 2019; LANGFELDT; KHATOKAR; GLEINE, 2022).
Ressonador		Perda de transmissão/ Absorção	Consiste em um painel plano composto por uma distribuição periódica de fendas. Cada fenda está ligada a um conjunto de ressonadores de Helmholtz, sintonizados em diferentes frequências (JIMÉNEZ <i>et al.</i> , 2016; ROMERO-GARCIA; HLADKY-HENNION, 2019; JIANG, 2012).
Espaço enrolado		Absorção	Estrutura compacta com comprimento interno efetivo maior que a espessura, deste modo consegue desempenho acústico em frequências bem baixas, menores que um quarto do comprimento de onda (GAN, 2018; WANG <i>et al.</i> , 2018a; DONDA <i>et al.</i> , 2019; WANG <i>et al.</i> , 2018b).

originado pela existência de movimentos relativos entre seus componentes constituintes. Em virtude disso, pode haver uma diferença significativa entre a resposta inercial do sistema $M(x)$ e seu valor estático, então o conceito de massa efetiva dinâmica do sistema deve ser entendido. É comum entre metamateriais acústicos a dispersão da densidade de massa, ocorrido na condição de antirressonância, na região entre duas ressonâncias. Operando nesta região, ambas ressonâncias são excitadas, em fases opostas. O valor da massa efetiva dinâmica possui forte dispersão com a frequência devido a estas ressonâncias. Isto faz com que a densidade de massa dinâmica efetiva varie entre valores muito altos até negativos. Nestas condições, a onda acústica será fortemente atenuada no interior da estrutura, produzindo uma reflexão quase total da onda sonora (GAN, 2018).

A investigação do comportamento da massa dinâmica efetiva de um sistema dinâmico foi realizado para uma microestrutura de ressonador duplo constituída por três massas e duas molas, como demonstrada pela Figura 8a. O modelo analítico pode ser obtido considerando as equações de movimentos para as três massas individuais e igualando toda a microestrutura como uma massa efetiva. As três respectivas equações de movimento para as massas são: $m_3\ddot{u}_3 = F + k_1(u_1 - u_3)$, $m_1\ddot{u}_1 = F + k_2(u_2 - u_1) + k_1(u_3 - u_1)$ e $m_2\ddot{u}_2 = F + k_2(u_1 - u_2)$. Como a equação $F_0 = -m_{ef}\omega^2\hat{u}_3$ deve ser satisfeita, ao resolver as equações e normalizar, a massa efetiva para o modelo de dois ressonadores pode ser escrita como:

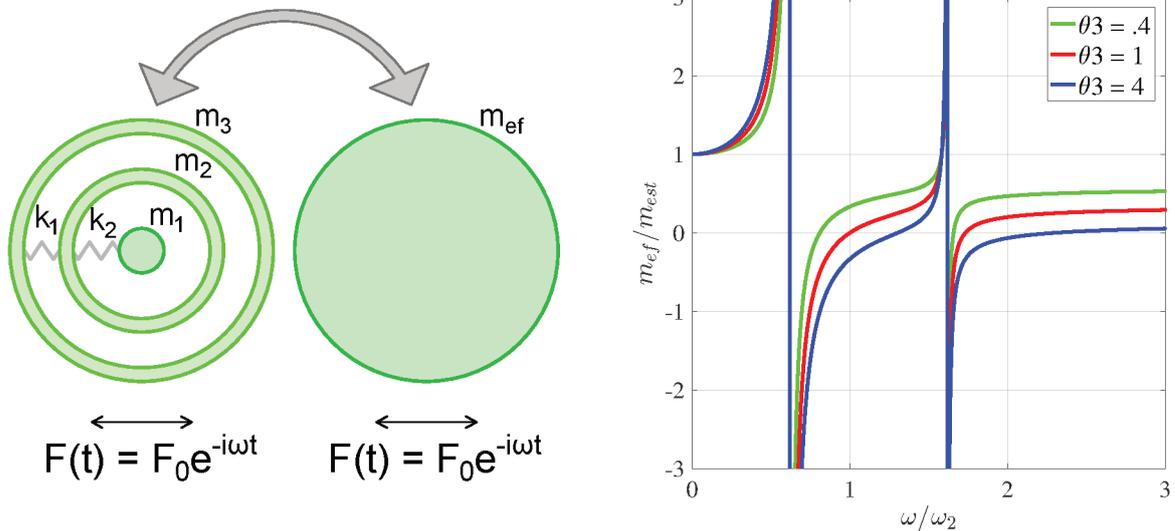
$$\frac{m_{ef}}{m_{est}} = \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_3 + \theta_1\theta_3} + \frac{\theta_3}{\theta_1 + \theta_3 + \theta_1\theta_3} \times \left\{ \frac{1 + \theta_1 - (\omega/\omega_2)^2}{[1 - (\omega/\omega_2)^2][1 + \delta_1 - (\delta_1/\theta_1)(\omega/\omega_2)^2] - \delta_1} \right\}, \quad (2.3)$$

onde $m_{est} = m_1 + m_2 + m_3$ representa a massa estática da microestrutura, $\omega_2\sqrt{k_2/m_2}$ é a ressonância local da massa interna m_2 , $\theta_1 = m_2/m_1$ é a relação entre a massa m_2 e a massa central m_1 , $\theta_3 = m_2/m_3$ é a relação entre a massa m_2 e a massa externa m_3 e $\delta_1 = k_2/k_1$ é a relação entre a rigidez da mola k_2 e k_1 .

A Equação 2.3 depende das relações entre as massas e rigidez dos elementos do sistema. O gráfico representado pela Figura 8b demonstra o comportamento da massa efetiva de um sistema ao longo da frequência, é possível identificar faixas em que ocorre o fenômeno de massa efetiva negativa, para diferentes valores de θ_3 , nessas regiões onde o valor da massa efetiva altera do valor máximo positivo para o maior negativo. Quando a estrutura possui valor de massa efetiva negativa resulta no movimento do corpo na direção oposta a força aplicada (TAN; HUANG; SUN, 2012; LOVELOCK, 2014).

Figura 8 – Demonstração massa efetiva negativa.

- (a) Estrutura do sistema massa-mola e sua massa (b) Gráfico da massa efetiva normalizada em relação à frequência operacional normalizada.



Fonte: Adaptado de Tan, Huang e Sun (2012).

2.2.2.2 Módulo de volume efetivo negativo

No contexto da elasticidade, o módulo de volume descreve a deformação elástica que leva a uma mudança no volume da estrutura. Embora instável, é possível que um sistema com módulo de volume negativo exista no contexto da resposta dinâmica de um sistema elástico/acústico. Nesse caso, o material apresenta uma resposta fora de fase a um

campo de pressão. Em um estudo experimental, Fang *et al.* (2006) demonstraram que o módulo de volume negativo é causado pela dispersão de frequência de ressonâncias locais. Para esse fim, foi utilizado um guia de ondas ultrassônicas desviado por um conjunto de ressonadores de Helmholtz (GAN, 2018; DEYMIER, 2013).

A analogia elétrica para um sistema com dois ressonadores de Helmholtz foi realizada na Figura 9a, podemos representar a indutância como $H = \rho V_{\text{célula}}/A^2$ e a capacitância como $C = V_{\text{célula}}/B$, correspondendo respectivamente à densidade (ρ) e compressibilidade ($1/B$). Onde $V_{\text{célula}}$ e A representam, respectivamente, o volume e a área de seção transversal da célula unitária. O valor da capacitância efetiva do sistema pode ser determinado com:

$$j\omega C_{ef} = j\omega C_{ar} + \frac{1}{j\omega H_{HR1} + \frac{1}{j\omega C_{HR1}}} + \frac{1}{j\omega H_{HR2} + \frac{1}{j\omega C_{HR2}}}, \quad (2.4)$$

onde os parâmetros elétricos e acústicos podem ser relacionados, sendo $C_{HR1} = \frac{V_1}{B_{ar}}$, $C_{HR2} = \frac{V_2}{B_{ar}}$, $H_{HR1} = \frac{\rho_{ar} l_1}{S_1}$ e $H_{HR2} = \frac{\rho_{ar} l_2}{S_2}$.

Relacionando os parâmetros da analogia elétrica para o sistema de ressonadores, com V_1 e V_2 , S_1 e S_2 , l_1 e l_2 , representando, respectivamente, os volumes, áreas de seção transversais e comprimento dos pescoços dos ressonadores, D representa o comprimento da estrutura. A relação do módulo de volume da estrutura com o ar é descrito pela Equação:

$$B_{ar}/B_{ef} = 1 + \frac{\omega_1^2 \frac{V_1}{AD}}{\omega_1^2 - \omega^2} + \frac{\omega_2^2 \frac{V_2}{AD}}{\omega_2^2 - \omega^2}, \quad (2.5)$$

onde as frequências naturais dos ressonadores valem $\omega_1^2 = \frac{S_1 B_{ar}}{\rho l_1 V_1}$ e $\omega_2^2 = \frac{S_2 B_{ar}}{\rho l_2 V_2}$ (JEON *et al.*, 2021).

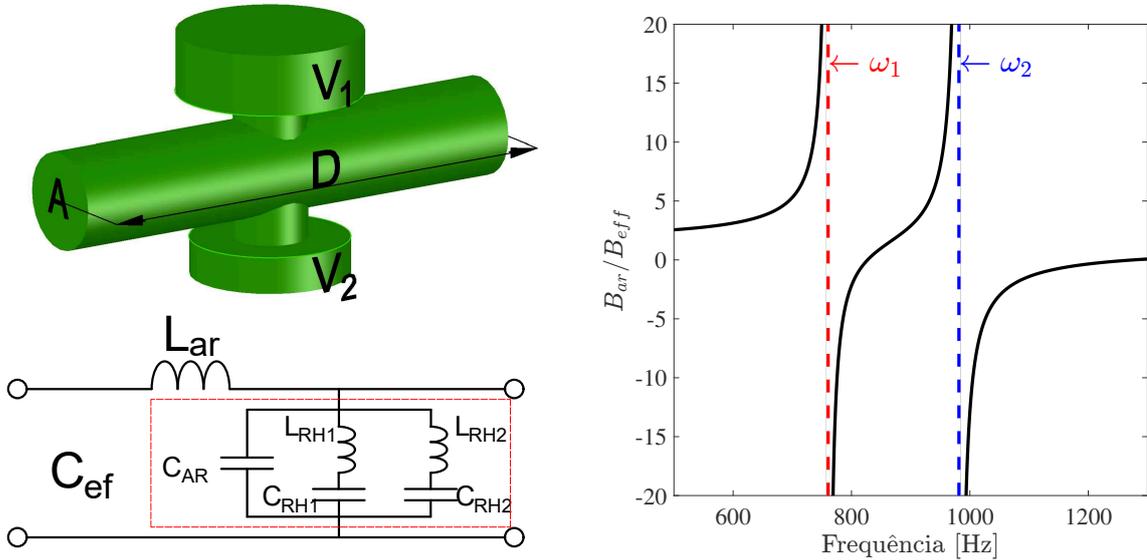
A Figura 9b demonstra o comportamento do módulo de volume de um sistema com dois ressonadores ao longo da frequência. Para as frequências de ressonância ω_1 e ω_2 , os valores de B_{ar}/B_{ef} divergem de infinito positivo para negativo, o módulo de volume entre as duas frequências, apresenta valores que variam de negativo para positivo. A negatividade no módulo de volume significa que o meio se expande sob compressão e se contrai ao ser liberado (JEON *et al.*, 2021; DEYMIER, 2013).

2.3 Modelo analítico de uma metamaterial acústico do tipo espaço enrolado

Um modelo de absorvedor acústico de baixas frequências foi proposto por Wang *et al.* (2018a), no trabalho os autores apresentam um design de metamaterial acústico baseado em cavidades com espaços enrolados e microperfuração do tipo circular. A utilização

Figura 9 – Demonstração do módulo de volume efetivo negativo.

- (a) Estrutura com dois ressonadores posicionados e o circuito elétrico equivalente.
- (b) Curva de módulo de massa de dois HRs. As linhas pontilhadas vermelhas e azuis denotam a frequência de ressonância de cada HR, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Jeon *et al.* (2021).

de espaço enrolado permite ao material absorver frequências sonoras mais baixas sem precisar aumentar a espessura do dispositivo. Por fim, os autores não estudaram o efeito da utilização de perfurações com perfis diferentes, como do tipo quadrado ou fenda.

A escolha do modelo de metamaterial do tipo espaço enrolado para o estudo é justificada pela facilidade que as geometrias combinam com a técnica de construção utilizando corte a laser e camadas justapostas. Não é exigido grande precisão com relação à altura da geometria, parâmetros w e h (ver Figura 10). O modelo de espaço enrolado geralmente possui grande sensibilidade nos parâmetros do painel frontal microperfurado da amostra, este tipo de construção é especialmente preciso com manufatura a laser. Deste modo, o modelo de espaço enrolado é capaz de superar as limitações da técnica sem grandes prejuízos no desempenho, além de aproveitar das vantagens relacionadas a precisão da tecnologia laser (CASSETTARI *et al.*, 2022).

2.3.1 Absorção sonora

A impedância de superfície \tilde{Z}_s do metamaterial acústico (Equação 2.6) pode ser calculada pela soma de \tilde{Z}_c , que representa a impedância da cavidade enrolada e depende das dimensões dos espaços internos, com a impedância do painel perfurado \tilde{Z}_p , sendo que esta tem dependência direta com o tipo de perfuração e suas dimensões (LIU *et al.*, 2020).

$$\tilde{Z}_s = \tilde{Z}_p + \tilde{Z}_c. \quad (2.6)$$

O coeficiente de absorção sonora (α) pode ser determinado a partir da impedância total da superfície \tilde{Z}_s , utilizando a Equação 2.7,

$$\alpha = 1 - \left| \frac{\tilde{Z}_s/Z_0 - 1}{\tilde{Z}_s/Z_0 + 1} \right|^2, \quad (2.7)$$

onde Z_0 representa a impedância acústica do ar, $Z_0 = \rho_0 c_0$ (Para o ar a 20°C, $c_0 = 343 \text{ m/s}$ e $\rho_0 = 1,21 \text{ kg/m}^3$ representam respectivamente a velocidade de propagação do som e a densidade) (WANG *et al.*, 2018a).

2.3.2 Cavidades

A impedância acústica da cavidade de espaço enrolado \tilde{Z}_c é calculada utilizando a Equação 2.8,

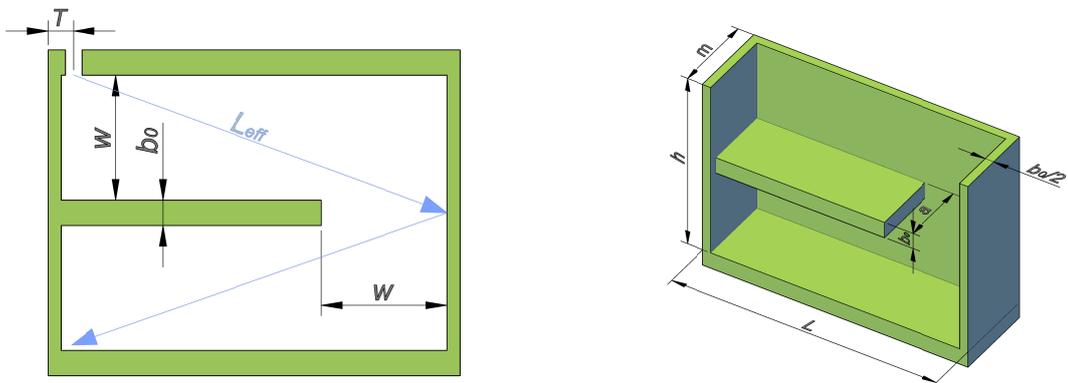
$$\tilde{Z}_c = -j \frac{S_0}{S_1} \tilde{Z}_e^c \cot(\tilde{k}_{eq} L_{ef}), \quad (2.8)$$

onde $S_0 = m \times L$ e $S_1 = a \times w$ são as seções da área transversal da célula e do espaço enrolado, L_{ef} é o comprimento efetivo de propagação interno e $\tilde{k}_{eq} = w \sqrt{\tilde{\rho}_{eq} \tilde{C}_{eq}}$ é a constante efetiva de propagação do canal, os parâmetros estão representados na Figura 10 (WANG *et al.*, 2018a).

Figura 10 – Dimensões das cavidades de espaços enrolados.

(a) Vista lateral.

(b) Vista tridimensional.



Fonte: O autor.

Para o espaço enrolado, $\tilde{Z}_e^c = \sqrt{\tilde{\rho}_{eq} \tilde{C}_{eq}}$ representa a impedância característica, seguindo o modelo teórico de dissipação visco-térmica proposto por Stinson (1991), é possível determinar a função de densidade complexa ($\tilde{\rho}_{eq}$) calculada com a Equação 2.9,

$$\tilde{\rho}_{eq} = \rho_0 \frac{\nu a^2 w^2}{4jw} \times \left[\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_k^2 \beta_n^2 \times \left(\alpha_k^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega}{\nu} \right) \right]^{-1} \right]^{-1}. \quad (2.9)$$

A função de compressibilidade (\tilde{C}_{eq}) obtida pela Equação 2.10,

$$\tilde{C}_{eq} = \frac{1}{P_0} \left\{ 1 - \frac{4j\omega(\gamma - 1)}{\nu' a^2 w^2} \times \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_k^2 \beta_n^2 \left(\alpha_k^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega\gamma}{\nu'} \right) \right]^{-1} \right\}, \quad (2.10)$$

onde P_0 e γ são respectivamente a pressão atmosférica e a razão do calor específico, $\alpha_k = (k + 1/2)\pi/a$ e $\beta_n = (n + 1/2)\pi/w$ são constantes, os parâmetros $\nu = \eta_{ar}/\rho_0$ e $\nu' = \kappa/\rho_0 C_v$ são calculados a partir da viscosidade do ar (η_{ar}), condutividade térmica (κ) e calor específico a volume constante (C_v) (WANG *et al.*, 2018a; LIU *et al.*, 2020).

2.3.3 Perfuração do tipo circular (modelo de painel perfurado)

Um orifício circular tem comportamento similar a um tubo curto, a representação da geometria de uma célula com perfuração do tipo circular é demonstrada na Figura 11, Rayleigh (1894) foi o primeiro a equacionar a propagação da onda sonora em tubo estreito, posteriormente o equacionamento para tubos mais curtos que o comprimento de onda foi simplificado por Crandall (1926), com a Equação 2.11 pode-se determinar a impedância acústica de um painel com furação circular (WANG *et al.*, 2018a; LIU *et al.*, 2020).

$$\tilde{Z}_p = \frac{j\omega\rho_0 t}{\Theta} \left[1 - \frac{2J_1(\Gamma\sqrt{-j})}{\Gamma\sqrt{-j}J_0(\Gamma\sqrt{-j})} \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2}\eta\Gamma}{\Theta d} + \frac{j0,85\omega\rho_0 d}{\Theta F(\varepsilon)}, \quad (2.11)$$

onde $\Gamma = d\sqrt{\frac{\rho_0\omega}{4\eta}}$ é a constante de perfuração, $\Theta = NA_f/S_0$ a porosidade, A_f e N sendo respectivamente a área e o número de perfurações. J_0 e J_1 são respectivamente as funções de Bessel de ordem zero e um.

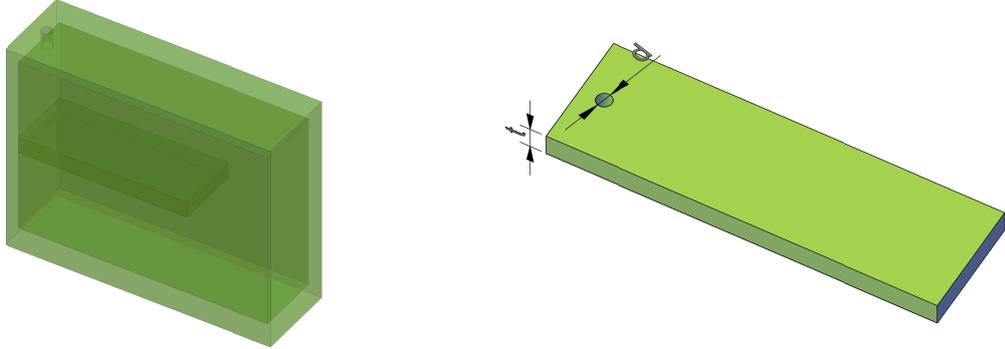
2.3.4 Perfuração do tipo quadrada (modelo de fluido equivalente)

A representação da geometria de uma célula com perfuração do tipo quadrada é demonstrada na Figura 12. Para o cálculo da impedância do painel com perfuração quadrada foi seguido o trabalho de Okuzono, Nitta e Sakagami (2019). A Equação 2.12 demonstra o cálculo da impedância, contudo alguns tratamentos devem ser realizados para corrigir efeitos da superfície, onde t é a espessura do painel e ε a proporção de perfuração. O primeiro termo da Equação 2.12 está relacionado com os efeitos de perdas viscosas ocorridas no interior das perfurações, o segundo termo é devido aos efeitos resistivos, a resistência da superfície é $R_s = \sqrt{2\eta\rho_0\omega}/2$. Por fim, o terceiro termo expressa a parte

Figura 11 – Célula unitária de metamaterial acústico com perfuração do tipo circular.

(a) Vista tridimensional com efeito de raio-x.

(b) Detalhamento da tampa.



Fonte: O autor.

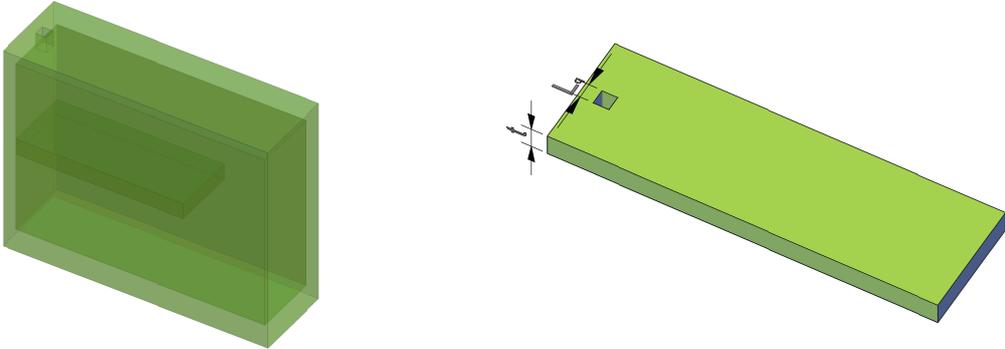
reativa e a correção pelo fator δ devido ao efeito da massa de ar contida na perfuração quadrada.

$$\tilde{Z}_p = \frac{j\omega\tilde{\rho}_e t}{\varepsilon} + \frac{\alpha 2R_s}{\varepsilon} + \frac{j\omega\rho_0\delta}{\varepsilon}. \quad (2.12)$$

Figura 12 – Célula unitária de metamaterial acústico com perfuração do tipo quadrado.

(a) Vista tridimensional com efeito de raio-x.

(b) Detalhamento da tampa.



Fonte: O autor.

A densidade efetiva complexa dentro da perfuração $\tilde{\rho}_e$ que incorpora a perda viscosa, é dada pela Equação 2.13 e funciona para formatos arbitrários de seção transversal de perfuração (ALLARD; ATALLA, 2009).

$$\tilde{\rho}_e = \rho_0 \left(1 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\rho_0} \frac{-\frac{s}{4}\sqrt{-j} \frac{J_1(s\sqrt{-j})}{J_0(s\sqrt{-j})}}{1 - \frac{2}{s\sqrt{-j}} \frac{J_1(s\sqrt{-j})}{J_0(s\sqrt{-j})}} \right), \quad (2.13)$$

onde $\sigma\phi$ é a resistividade ao fluxo e depende da forma da seção transversal da perfuração, no caso circular $\sigma\phi = 8\eta r^2$ e para perfuração quadrada, calculado com a Equação 2.14,

$$\sigma\phi = 7\eta r^2, \quad (2.14)$$

sendo o raio hidráulico \bar{r} definido como $\bar{r} = 2S_t/l$, onde l é o perímetro e S_t a área da seção transversal da perfuração. O parâmetro s é dado pela Equação 2.15,

$$s = c\sqrt{\frac{8\omega\rho_0}{\sigma\phi}}, \quad (2.15)$$

onde o valor de c depende da forma sendo $c = \sqrt{8\eta/\sigma\phi/\bar{r}}$.

2.3.5 Perfuração do tipo fenda (modelo de Maa)

A representação da geometria de uma célula com perfuração do tipo fenda é demonstrada na Figura 13. A impedância acústica de uma perfuração do tipo fenda, quando o comprimento é muito maior que seu diâmetro, é calculada utilizando uma aproximação da geometria de uma elipse, usando então a função tangente hiperbólica (VILLAMIL, 2012). O cálculo da impedância acústica \tilde{Z}_{fenda} para uma face com perfuração do tipo fenda é dado pela Equação 2.16,

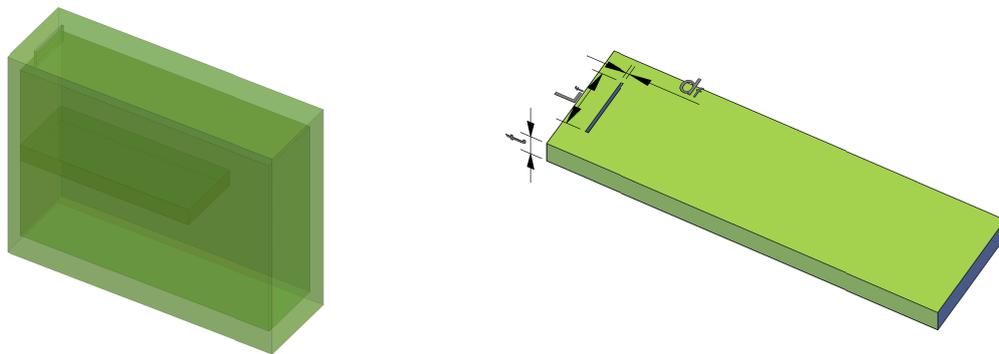
$$\tilde{Z}_{fenda} = \frac{\Delta P}{\nu} = \frac{j\omega\rho_0 t}{\Theta} \left[1 - \frac{\tanh(\Gamma\sqrt{j})}{\Gamma\sqrt{j}} \right]^{-1}, \quad (2.16)$$

sendo $\Theta = d_f L_f / mL$ a porosidade e $\Gamma = d_f \sqrt{\rho_0 \omega / 4\eta}$ a constante de perfuração para fenda.

Figura 13 – Célula unitária de metamaterial acústico com perfuração do tipo fenda.

(a) Vista tridimensional com efeito de raio-x.

(b) Detalhamento da tampa.



Fonte: O autor.

No trabalho de Maa (2000) são caracterizadas as fórmulas exatas e aproximadas para a impedância de um absorvedor acústico de microfenda. Ao associar várias fendas próximas, existe uma alteração no fluxo de ar e conseqüentemente a impedância do painel é alterada, correções devem ser aplicadas ao modelo para ele ser capaz de representar com

mais exatidão o comportamento acústico. Deste modo deve ser adicionado o termo \tilde{Z}_{aresta} , composta de uma parte reativa X_m causados pela radiação de ar no final da furação e outra resistiva R_s devido aos efeitos de atrito e viscosidade estão demonstrados na Equação 2.17 (COBO; SIMÓN, 2019).

$$\tilde{Z}_{aresta} = R_s + jX_m = \frac{\sqrt{2\rho_0\eta\omega}}{2\Theta} + j\omega\rho_0\frac{F_e d_f}{2F(\varepsilon)\Theta}. \quad (2.17)$$

A correção devido a radiação do ar é realizada pela função de Fok, como demonstrado pela Equação 2.18,

$$F(\varepsilon) = \left(1 - 1,4092\varepsilon + 0,33818\varepsilon^3 - 0,06793\varepsilon^5 - 0,02287\varepsilon^6 + 0,03015\varepsilon^7 - 0,01641\varepsilon^8\right)^{-1}, \quad (2.18)$$

onde $\varepsilon = d_f/L$. A aproximação do formato retangular da fenda por uma elipse é realizada com a Equação 2.19,

$$F_e = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta}}, \quad (2.19)$$

onde $e = \sqrt{1 - (d_f/2L_f)^2}$ representa a excentricidade da elipse.

A impedância acústica \tilde{Z}_p do painel com micro fenda, com todas as correções é dado pelas somas das impedâncias \tilde{Z}_{fenda} dada pela Equação 2.16 e as correções \tilde{Z}_{aresta} (ver Equação 2.17) resultando nos valores da Equação 2.20.

$$\tilde{Z}_p = \frac{j\omega\rho_0 t}{\Theta} \left[1 - \frac{\tanh(\Gamma\sqrt{j})}{\Gamma\sqrt{j}}\right]^{-1} + \frac{\sqrt{2\rho_0\eta\omega}}{2\Theta} + j\omega\rho_0\frac{F_e d_f}{2F(\varepsilon)\Theta}. \quad (2.20)$$

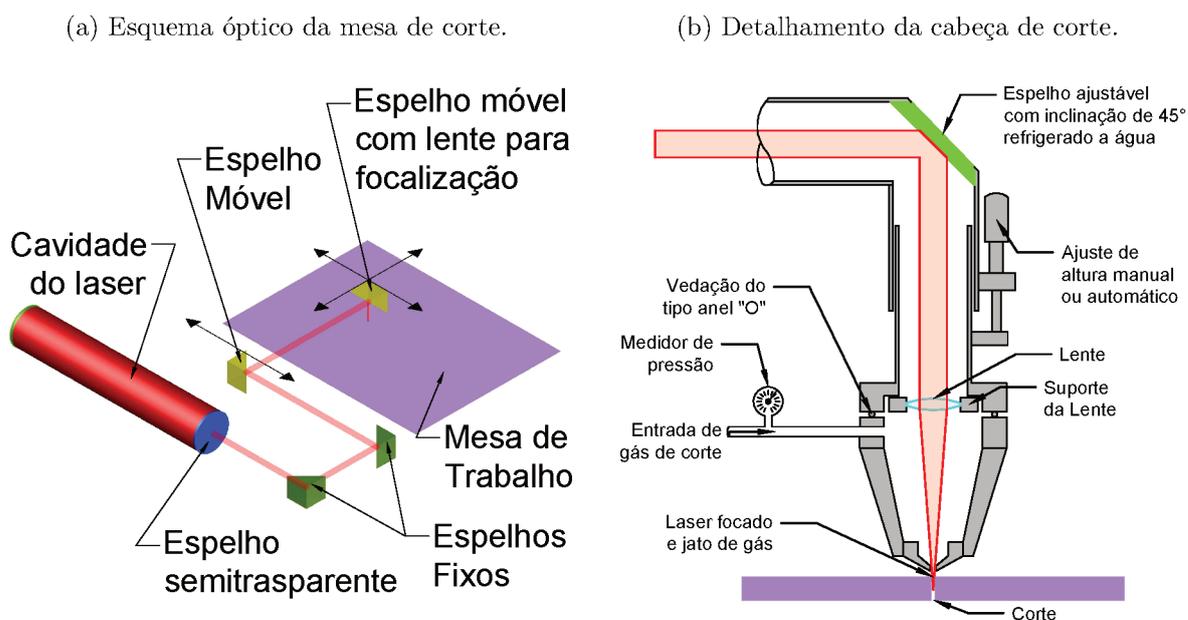
2.4 Técnica de fabricação com corte laser

O sucesso da utilização do laser em processos de corte está na grande densidade de energia concentrada no ponto focal ou "ponto quente" (POWELL, 1993). O processo básico é simples e pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Um feixe de luz de alta intensidade é gerado por um laser;
2. O feixe é focalizado na superfície de corte através de uma lente como mostrado na Figura 14b;
3. A luz focalizada aquece o local em um ponto específico gerando fusão do material;

4. O material fundido é expulso da área por um jato de gás pressurizado agindo simultaneamente com o feixe de laser;
5. O laser é movido por toda a área de corte pelo movimento dos espelhos controlados por um computador (Figura 14a).

Figura 14 – Equipamento de corte a laser.



Fonte: Adaptada de Webb e Jones (2004), Guo e Singh (2021).

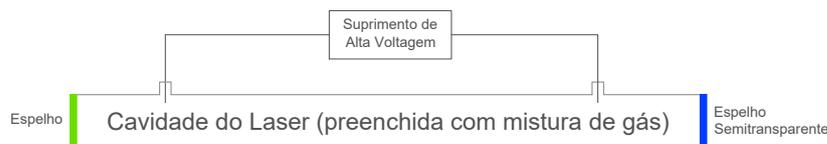
Os cortes das matérias-primas em MDF e acrílico são geralmente realizados utilizando tecnologia laser em CO_2 , devido ao menor custo da hora-máquina e excelente qualidade do acabamento dos cortes. Contudo, para os cortes em materiais metálicos, principalmente aço carbono, como tecnologia de geração do feixe de laser, pode ser utilizado Nd:YAG ou Fibra, dependendo da disponibilidade do fornecedor. Ambas tecnologias resultam em cortes com qualidades de acabamento e precisão similares.

2.4.1 Laser de CO_2

Os princípios de funcionamento são iguais para qualquer laser de CO_2 . As principais diferenças de projeto estão relacionadas principalmente com a maneira de excitar e resfriar a mistura de gás na cavidade do laser. A Figura 15 apresenta um esquema de um laser de CO_2 , um fluxo de elétrons de alta energia é passado através de uma mistura específica de gás em baixa pressão consistindo de CO_2 , nitrogênio e hélio. Um feixe paralelo de luz infravermelha é gerado no tubo contendo o gás. Nitrogênio e hélio fazem parte da mistura para tornar a ação do laser mais eficiente (POWELL, 1993).

Máquinas de corte a laser de CO_2 são populares por cortar três tipos de materiais, são eles os: polímeros, produtos à base de madeira e cerâmicas. São vários os mecanismos

Figura 15 – Tubo de geração do feixe de luz laser.



Fonte: Adaptada de Powell (1993).

físicos responsáveis pelo corte além da fusão. Para o caso do acrílico, o local focalizado é vaporizado em vez de derretido. Materiais à base de madeira ou resinas epóxi não podem ser derretidos, deste modo são queimados localmente. A diferença dos mecanismos de corte geram mudanças na qualidade do acabamento da peça, podendo apresentar um corte mais preciso (WEBB; JONES, 2004).

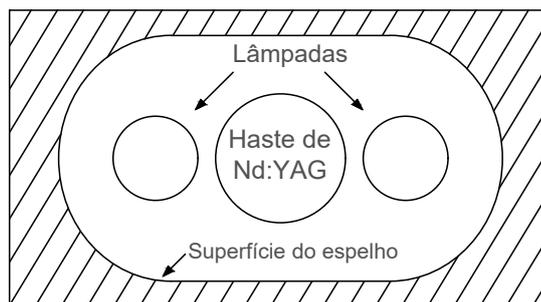
Materiais metálicos também podem ser cortados usando tecnologia laser. Para a temperatura ambiente, todos os metais refletem muito bem a luz do laser de CO_2 . Entretanto, a medida que são aquecidos, os metais aumentam o grau de absorção, aquecendo ainda mais até o ponto de fusão. Alguns metais combinam características que dificultam ou até inviabilizam o corte, são a alta reflexão e condução. Deste modo, a pouca energia que conseguem absorver localmente rapidamente é dissipada para toda a peça, dificultando a fusão pontual do material. São exemplos de metais difíceis de cortar: cobre e alumínio, no extremo destas características temos o ouro, sendo impraticável o corte utilizando tecnologia laser (POWELL, 1993).

2.4.2 Laser de Nd:YAG

Os equipamentos de Nd:YAG usam um meio ativo de cristal de estado sólido para gerar um feixe de laser. Embora sejam aplicados os mesmos princípios físicos dos lasers de CO_2 , as especificações de tecnologia, engenharia e design diferem drasticamente. A Figura 16 demonstra o funcionamento de um laser Nd:YAG. O meio laser é um cilindro transparente de YAG (ítrio-alumínio-granada) contendo íons de neodímio (Nd^{3+}). Estes íons recebem energia pela luz de alta potência de lâmpadas de xenônio ou criptônio. Toda esta energia adicionada eleva a energia dos íons Nd^{3+} . O íon permanece neste estado excitado metaestável até ser acionado para liberar sua energia, iniciando o feixe de laser (POWELL, 1993; CARISTAN, 2004).

A absorvidade dos metais à luz infravermelha aumenta com a redução do comprimento de onda. Os lasers Nd:YAG são mais adequados para processar este tipo de material de alta condutividade-refletividade, pois seu comprimento de onda de saída é cerca de um décimo do comprimento de onda do laser de CO_2 . Os lasers Nd:YAG encontraram um mercado em aplicações onde é necessário cortar materiais com detalhes ou metais altamente refletivos (CARISTAN, 2004; POWELL, 1993).

Figura 16 – Diagrama esquemático de um laser Nd:YAG mostrado em seção transversal.



Fonte: Adaptada de Powell (1993).

O feixe de laser de Nd:YAG possui um comprimento de onda menor, quando comparado com o laser de CO_2 , com isso ele possui algumas vantagens (WEBB; JONES, 2004):

- O laser de Nd:YAG pode ser focada em um ponto menor do que a luz laser CO_2 , com isso mais precisão pode ser alcançada;
- A luz do laser de Nd:YAG é menos facilmente refletida pelas superfícies metálicas. Por esta razão, este tipo de laser é adequado para trabalhar em materiais altamente refletivos.
- O laser Nd:YAG pode atravessar o vidro. Isso significa que lentes melhores podem ser usadas para focar o feixe até um ponto mínimo, sobre o material a ser processado. Além disso, fibras ópticas podem ser empregadas para transportar o feixe a distâncias relativamente longas até a peça de trabalho.

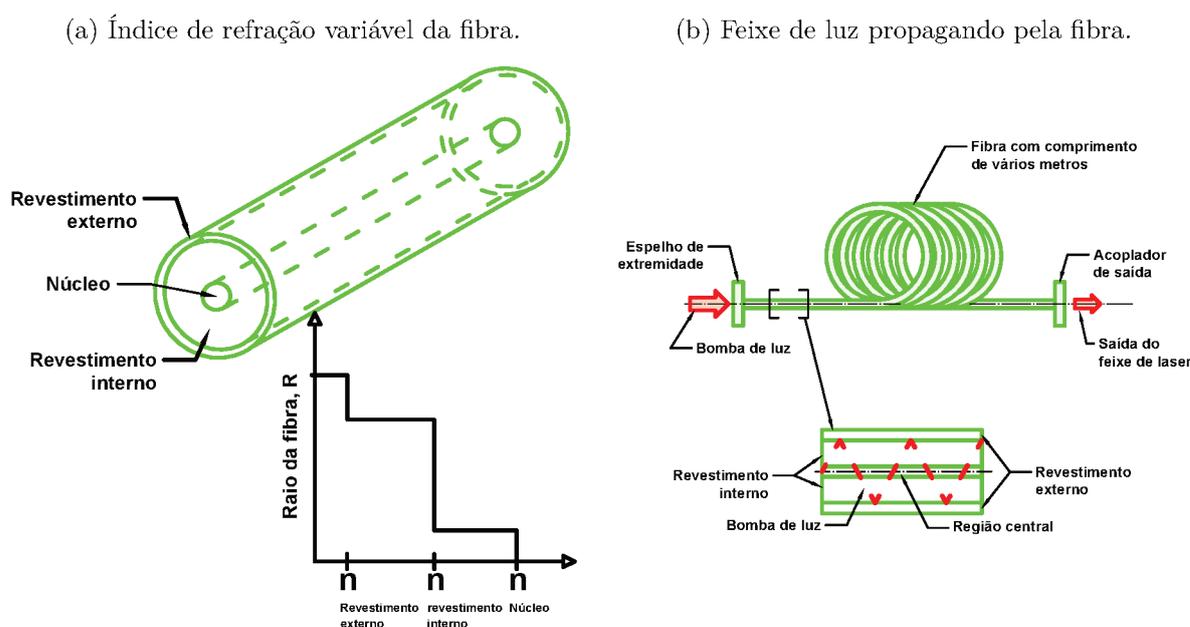
2.4.3 Laser de fibra

Os lasers de fibra pertencem ao grupo de lasers de estado sólido. Esses equipamentos foram estudados quase desde o início da demonstração do laser. Essa tecnologia tem sido amplamente estudada devido às suas características únicas de robustez, alta qualidade do feixe e confinamento de alta potência. Em geral, os lasers de fibra são atraentes para diferentes áreas de aplicação, como medicina, telecomunicações, sensoriamento óptico e processamento de materiais industriais (PAUL, 2016).

O processo de geração do feixe de laser tem início em um núcleo de fibra de vidro com índice de refração mais alto que as vizinhanças. Esta região é dopada com íons de itérbio e cercada por um revestimento interno de índice de refração menor que o núcleo e o revestimento interno, este também, cercado por um revestimento externo de índice de refração ainda mais baixo, formando uma fibra de índice degrau (ver Figura 17a). Um raio de luz é gerado por uma matriz de diodos de alta potência e transmitido para o revestimento interno, essa luz é confinada no interior da fibra devido às diferenças de

índice de refração (ver Figura 17b). A luz, confinada no núcleo da fibra de vidro, mantém sua intensidade ao longo de um comprimento da estrutura. Durante o processo, a luz que se propaga na fibra é absorvida pelos íons de itérbio existentes no núcleo da fibra, resultando na emissão estimulada de um feixe de laser de alta potência (HÜGEL, 2000; CANNING, 2006; NILSSON *et al.*, 2004).

Figura 17 – Esquema da geração do laser de fibra.



Fonte: Adaptada de Paul (2016).

Os lasers de fibra de alta potência podem ser empregados em aplicações de processamento de materiais industriais anteriormente dominadas por outras tecnologias de laser, como CO_2 e Nd:YAG. Custo de propriedade, confiabilidade, facilidade de manutenção e robustez industrial são alguns dos principais atributos desejáveis para esses lasers (DIVLIANSKY, 2019).

2.5 Controle Estatístico de Processo

O Controle Estatístico de Processos (CEP) compreende um conjunto de métodos utilizados para planejar, monitorar e aprimorar um processo produtivo, permitindo alcançar melhorias sustentáveis na qualidade. O CEP é o instrumento oficial para obter a certificação *International Organization for Standardization* (ISO) 9000, por meio da estruturação de seus sistemas de qualidade. As ferramentas são aplicadas em dados coletados do sistema produtivo, e podem ser aplicadas em indústrias de manufatura ou serviços para otimizar a saída do processo (LOUZADA *et al.*, 2013; GODINA *et al.*, 2018; TESFAY, 2021).

Um processo de fabricação precisa ser estável e capaz de ser repetido, operando com pouca variabilidade ao redor do alvo ou dimensão nominal. Diversas ferramentas

estatística fazem parte do CEP, algumas simples, outras complexas, contudo em conjunto são capazes de encontrar, manter e melhorar a estabilidade de um processo através da redução da variabilidade. Entre as ferramentas utilizadas pode-se citar as cartas de controle de qualidade, análise de capacidade, Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) e análise de confiabilidade (MONTGOMERY; RUNGER, 2003; GODINA; RODRIGUES; MATIAS, 2018).

2.5.1 Cartas de controle

Uma ferramenta muito utilizada para visualizar e controlar as variabilidades do processo são as cartas de controle. Foi desenvolvido pelo físico Dr. Walter A. Shewhart na década de 1920. Este gráfico fornece informações visuais sobre o processo e pode ser utilizado para estimar parâmetros de produção, determinar a capacidade de um processo atingir especificações e reduzir variabilidades. É uma ferramenta vital para entender se o processo está sendo executado com base no requisito de qualidade aceitável (SHEWHART, 1931; MONTGOMERY; RUNGER, 2003; LOUZADA *et al.*, 2013; TEFAY, 2021).

Uma carta de controle típica é demonstrada pela Figura 18a, geralmente contém dois gráficos, um destinado ao valor médio e outro à amplitude, ambos com seus respectivos limites. São construídos a partir de uma característica da qualidade, que foi medida ou calculada. Os gráficos contêm uma Linha Central (LC), que representa o valor médio da característica da qualidade correspondendo ao estado sob controle. Também possui duas outras linhas horizontais, denominadas de Limite Superior de Controle (LSC) e de Limite Inferior de Controle (LIC). Normalmente, os limites de controle são definidos dentro de três desvios padrão do alvo (ver Figura 18b), o qual é o valor nominal do processo. Isso significa que se o processo é estável (controlado), cerca de 99,73% de toda a produção fica dentro dos limites superior e inferior de controle. (MONTGOMERY; RUNGER, 2003; TEFAY, 2021; MONTGOMERY, 2012)

Os valores dos Limites Superior de Controle, Central e Inferior de Controle, podem ser determinados utilizando respectivamente as equações a seguir:

$$LSC = \mu_w + k\sigma_w, \quad (2.21)$$

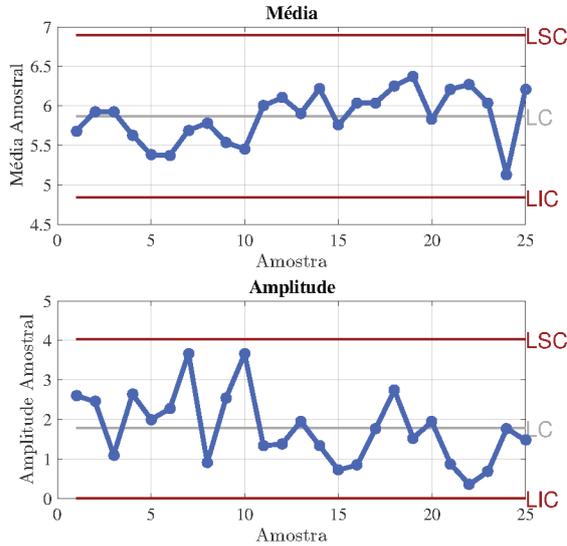
$$LC = \mu_w, \quad (2.22)$$

$$LIC = \mu_w - k\sigma_w, \quad (2.23)$$

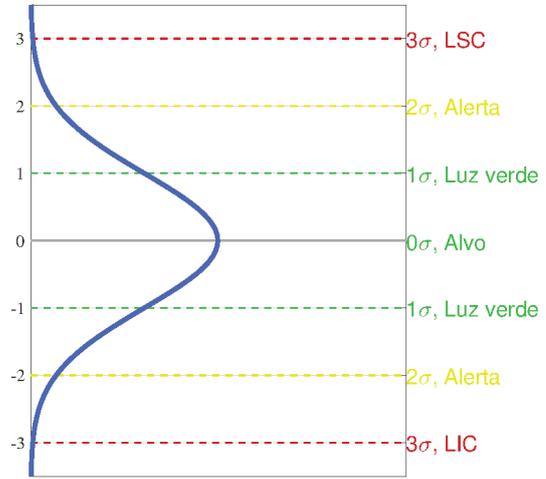
onde k representa a distância dos limites de controle a partir da linha central, expressa em unidades de desvio-padrão, μ_w a média e σ_w o desvio padrão (MONTGOMERY; RUNGER,

Figura 18 – Controle estatístico de processos.

(a) Exemplo de carta de controle.



(b) Curva de distribuição normal dos dados do processo.



Fonte: Adaptada de Ribeiro e Caten (2012), Tesfay (2021), Oakland (2007), MONTGOMERY e RUNGER (2003).

2003; LOUZADA *et al.*, 2013).

2.5.2 Teste de normalidade

Para efetuar algumas análises é necessário garantir que a variável de estudo seja normalmente distribuída. A avaliação de normalidade pode ser efetuada por meio de algumas ferramentas estatísticas ou testes de hipóteses. O teste de Shapiro-Wilk é um dos mais frequentes para o teste de normalidade. Tem por objetivo avaliar as hipóteses: i) H_0 : A variável segue uma distribuição normal, ii) H_1 : A variável não segue uma distribuição normal. O teste foi proposto por Shapiro e Wilk (1965), tem como base o cálculo do parâmetro W , utilizando a Equação 2.24:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \tag{2.24}$$

sendo x_i os valores amostrais ordenados ($x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$) e os valores de a_1, a_2, \dots, a_n são a solução do sistema:

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) = \frac{m'V^{-1}}{\sqrt{m'V^{-1}V^{-1}m}}, \tag{2.25}$$

onde V representa a matriz de covariâncias e $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ o vetor de valores esperados da estatística de ordem da amostra (LOUZADA *et al.*, 2013).

2.5.3 Análise de capacidade

O estudo quantitativo da qualidade pode ser realizado em situações onde existam limites de especificações para o processo. O CEP, para estes casos, tem o objetivo de analisar as condições do processo em atender ao longo do tempo às especificações pré-estabelecidas. A importância desta análise está em impedir que o nível da qualidade do produto ou serviço reduza, em alguns momentos, devido às variações naturais do processo. O índice de Capacidade do Processo (C_p) é a medida estatística para determinar a competência de um determinado processo em produzir produtos com base nos requisitos estabelecidos, este índice relaciona os desempenhos real e especificado do processo. Assim, um processo com alta capacidade resulta em produtos dentro da faixa de especificação, com valores próximos à linha central da média do processo. Além da simplicidade dos cálculos e interpretação, os índices de capacidade permitem resumir em um único valor a condição do processo, conferindo possibilidade da tomada rápida decisão embasada em resultados estatísticos (LOUZADA *et al.*, 2013; TESHAY, 2021; OAKLAND, 2007).

Quando um processo está sob controle estatístico, apenas causas aleatórias ou comuns de variação estão presentes e o índice de capacidade do processo pode ser calculado. Os índices de capacidade do processo são simplesmente um meio de indicar a variabilidade de um processo em relação à tolerância de especificação do produto. A análise de capacidade do processo deve ser precedida da verificação de alguns itens, que necessariamente devem ser respeitados, para garantir a confiabilidade da interpretação dos resultados observados (LOUZADA *et al.*, 2013; OAKLAND, 2007; TESHAY, 2021):

- Os índices devem ser calculados para amostras que estejam sob controle, ou seja, amostras que possuam seus parâmetros invariáveis ao longo do tempo;
- A variável observada deve seguir uma distribuição normal, caso contrário podem ocorrer erros substanciais na estimativa dos índices de capacidade, comprometendo sua interpretação;
- Caso a média do processo não seja igual ao centro dos limites de especificação, deve estar localizada pelo menos entre os limites de controle.

Para processos centrados (ver Figura 19a), o índice de capacidade pode ser calculado utilizando a Equação 2.26, processos com média diferente do valor central (ver Figura 19b), o índice deve ser calculado utilizando a Equação 2.27:

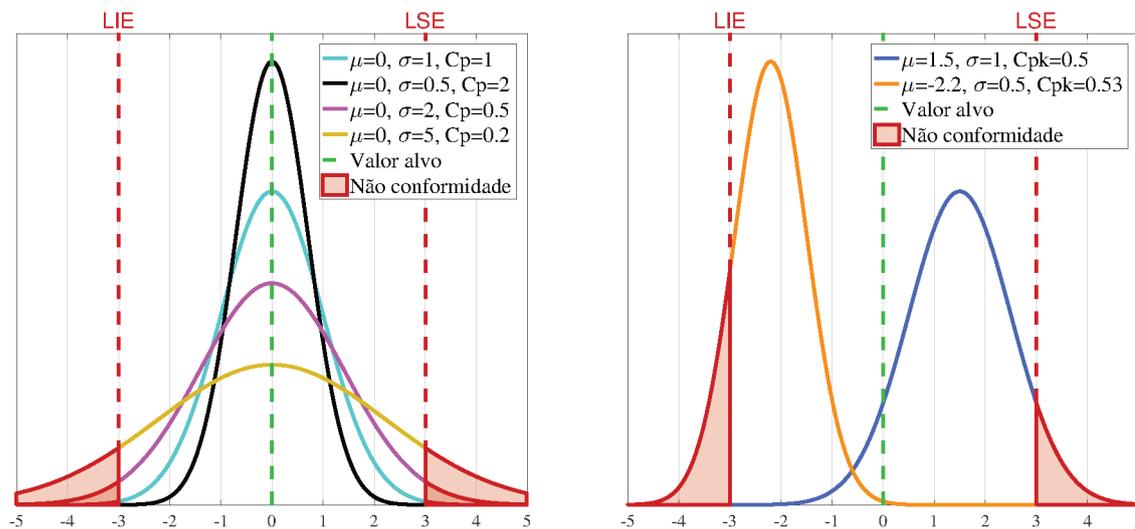
$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}, \quad (2.26)$$

$$C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right\}, \quad (2.27)$$

onde LSE e LIE são respectivamente os limites superior e inferior de especificação, μ e σ o valor médio e a variância do processo, respectivamente (TESFAY, 2021; LEVINSON, 2010; OAKLAND, 2007; LOUZADA *et al.*, 2013; MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Figura 19 – Análise da capacidade de processos.

(a) Processos com médias iguais ao valor alvo. (b) Processos com médias diferentes ao valor alvo.



Fonte: Adaptada de Tesfay (2021), GOUVEIA (2018), Oakland (2007), Montgomery (2012).

Situações onde o C_{pk} resulta em 1, significa que cerca de 99,73% dos produtos originados pelo processo estarão dentro dos limites de especificação. Muitas vezes, é estipulado um requisito mais rigoroso para garantir que os produtos da qualidade correta sejam obtidos de forma consistente a longo prazo (OAKLAND, 2007; TEFAY, 2021).

2.5.4 Aplicações do CEP para solução de problemas

As ferramentas contidas no controle estatístico de processos foram inicialmente idealizadas para o uso em situações industriais, onde o controle das variáveis do processo tem impacto direto na qualidade do produto. Huang *et al.* (2022) aplicaram cartas de controle e análise de capacidade, para o setor de fabricação de uma empresa de aviação. Foi verificado pelos autores a melhoria do processo de fabricação com a redução de variabilidade. Para o ambiente de manufatura de peças automotivas, cartas de controle e análise de capacidade também foram aplicadas por Sousa, Rodrigues e Nunes (2017), Godina *et al.* (2018). Staudhammer *et al.* (2005) analisaram, utilizando cartas de controle, a fabricação automatizada de madeira serrada com os dados de dimensão dos produtos aferidos por sensores laser. Foi obtido êxito em reduzir a variabilidade do processo em tempo real, com análise durante a produção. As ferramentas do CEP também foram utilizadas para o estudo de um processo de manufatura em plástico por Cao, Wong e Lee (2007), os autores aplicaram cartas de controle para visualizar a variação de pequenas peças

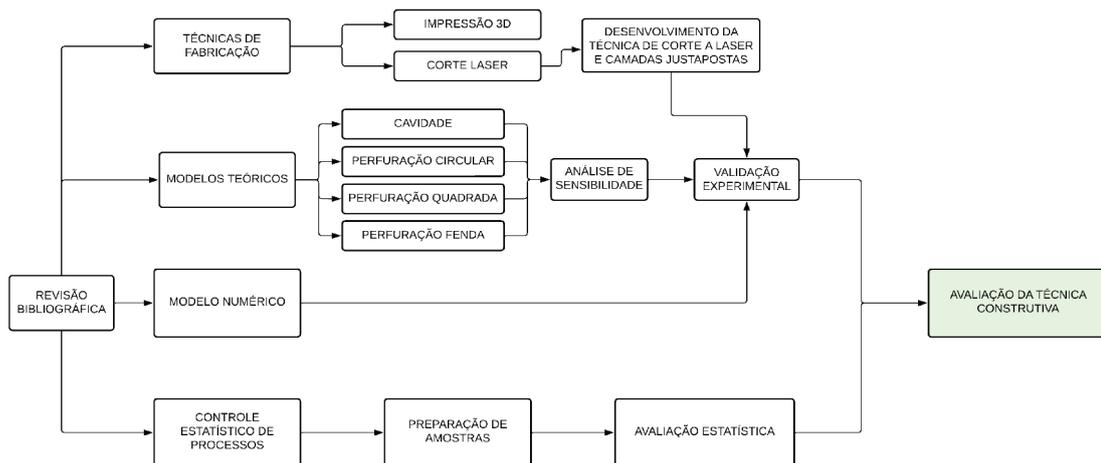
fabricadas em plástico e foi possível identificar os itens produzidos fora da especificação. Todos os estudos indicaram que o uso de ferramentas contidas no controle estatístico de processos resultam em um melhor entendimento das variáveis envolvidas na manufatura, e possibilitam identificar as principais fontes de erros, permitindo a correção e aumento da estabilidade da fabricação.

Por fim, a versatilidade do uso do Controle Estatístico de Processos permite sua utilização em diversos estudos além do ambiente industrial. Em áreas da saúde e medicina, Keller *et al.* (2020) utilizaram o CEP com a variável tempo de permanência hospitalar no pós-operatório, como uma medida para identificar falhas, melhorar a qualidade e reduzir custos de cirurgias. Além disso, López-Tarjuelo *et al.* (2015) utilizaram o método de CEP para o processo de monitoramento por feixe de elétrons de equipamentos de radioterapia, conseguindo avaliar a variabilidade do feixe de elétrons e indicar se um processo é capaz de manter os parâmetros dos elétrons sob controle em relação às especificações. Para áreas de engenharia, Hdz – Jasso *et al.* (2015) aplicaram o CEP para analisar os dados obtidos de um transformador de calor por absorção, mostrando que a temperatura permaneceu sob controle estatístico. No campo da engenharia civil, Behnia *et al.* (2019) conseguiram sucesso ao aplicar o CEP para monitorar a saúde estrutural de lajes mistas cimentícias. Para todos estes estudos, as ferramentas de controle estatístico de processos mostrou-se capaz de controlar a variação, além de expressar de forma clara quais variáveis estão dentro dos limites aceitáveis, com isso possibilitou a tomada de decisão para melhoria do processo.

3 Metodologia

Esta pesquisa foi desenvolvida em duas etapas principais. A primeira baseia-se em procedimentos computacionais, entre eles estão os modelos analíticos de absorção de metamateriais acústicos, algoritmos de otimização e simulação numérica utilizando o *software* COMSOL. A segunda parte teve como objetivo a fabricação, construção e ensaio de absorção sonora de diversas amostras em um tubo de impedância. Todas as atividades que compõem estas etapas estão especificadas nas subseções a seguir. O detalhamento dos principais itens cumpridos durante o desenvolvimento da pesquisa é demonstrado pela Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma das principais etapas seguidas durante o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: O autor.

3.1 Revisão bibliográfica

Uma ampla revisão bibliográfica foi realizada para embasar teoricamente o desenvolvimento deste projeto, entre os temas pesquisados estão: modelos de metamateriais acústicos, absorção sonora em baixas frequências e a técnica de corte a laser a partir de livros, periódicos especializados, além de trabalhos relevantes publicados em eventos sobre acústica. Dentre as diversas fontes de pesquisa pode ser destacado:

- *Journal of the Acoustical Society America (JASA)*;
- *Acta Acustica*;
- *Journal of Sound and Vibration (JSV)*;
- *Applied Acoustics*;
- *Archives Acoustics*;

- *Canadian Acoustics*;
- *Journal of Vibration and Acoustics*;
- *International of Acoustics and Vibration*;
- *Internoise*;
- *Euronoise*;
- *TECNIACÚSTICA*;
- *Symposium on Acoustic Metamaterials*;
- *International Congress on Sound and Vibration*;
- *International Commission for Acoustics - ICA*;
- *Forum Acousticum*;
- *Congresso Iberoamericano de Acústica da FIA*.

3.2 Modelos analíticos dos MMA

Os modelos analíticos visam prever o comportamento do metamaterial acústico, por meio deles é possível dimensionar a estrutura para adequar o desempenho da absorção acústica com maior eficácia na frequência desejada. De maneira geral, os modelos são baseados no cálculo da impedância acústica equivalente da estrutura. Assim, existe um modelo específico para o cálculo das cavidades de espaço enrolado e um modelo para o cálculo de cada perfil de perfuração. O desempenho total da estrutura é determinado ao somar o valor resultante das duas impedâncias acústicas. Vale destacar que os modelos analíticos consideram que a estrutura do metamaterial é composto por paredes rígidas, sem absorção adicional ou vazamento. Deste modo, caso no interior das amostras manufaturadas exista algum mecanismo adicional de absorção, como a porosidade interna, diferenças entre os resultados analíticos e experimentais podem ocorrer.

3.3 Modelo numérico do metamaterial selecionado

A análise de elementos finitos, chamada também de Método de Elementos Finitos (MEF), é uma ferramenta para solução numérica de problemas de campo. Um problema de campo requer que seja determinado a distribuição espacial de uma ou mais variáveis. O objetivo frequente dos modelos numéricos para o campo da acústica está em calcular as velocidades de partícula e o campo de pressão acústica em todos os nós da malha, para em seguida realizar o estudo desejável. O MEF é o método computacional mais frequente nos campos das ciências aplicadas e da engenharia. Também são utilizados na prática outros métodos incluindo volume finito, diferença finita, elementos de contorno e colocação (COOK *et al.*, 2007; TABATABAIAN, 2014).

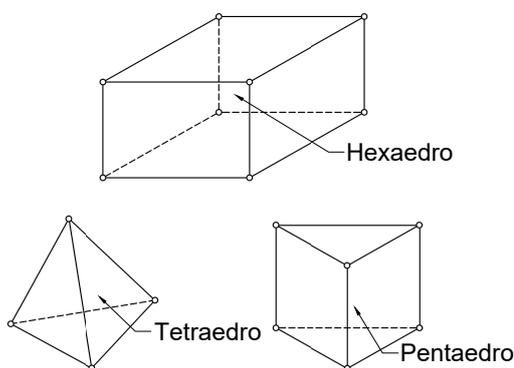
Alguns critérios são utilizados a fim de garantir um número mínimo de elementos,

resultando em uma discretização suficiente para evitar erros numéricos. Simulações com ondas acústicas são mais custosas do ponto de vista computacional, com o aumento da frequência, devido à redução do comprimento de onda e conseqüente elevação do número de elementos que deve ser utilizado na simulação. Para estudos em três dimensões, existem algumas geometrias básicas que podem compor a malha (ver Figura 21a), podendo ser selecionadas de acordo com a amostra estudada. Em um domínio tridimensional, a malha não é apenas mais complicada de fazer quando comparada com uma ou duas dimensões, contudo também difícil de visualizar, muitas malhas de teste podem ser necessárias se o domínio do problema for complexo (HEINRICH JUAN C.; PEPPER, 2017).

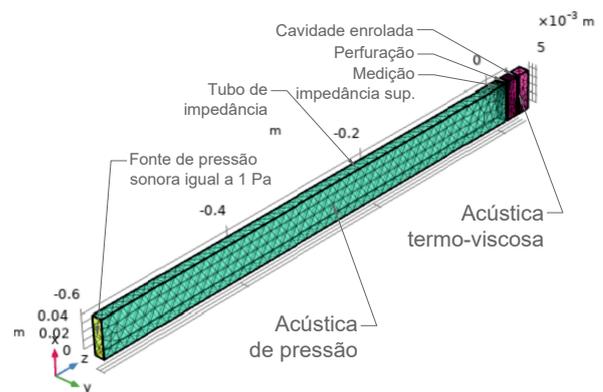
O estudo numérico utilizando o método de elementos finitos consiste na etapa de construção da geometria, geração da malha, definição das propriedades físicas dos elementos e a definição das condições de contorno. Todas as simulações computacionais foram construídas no *software* comercial COMSOL *Multiphysics*. O modelo construído replica o experimento de tubo de impedância, onde uma pressão acústica de 1 Pa em uma das extremidades do domínio de estudo é aplicada, na outra extremidade a amostra de metamaterial acústico é posicionada (ver Figura 21b). A malha da geometria foi criada com elementos do tipo tetraédrico, com diferentes níveis de refinamento, dependendo da complexidade da geometria e faixa de frequência de interesse. A absorção sonora do material estudado é calculada com a determinação da pressão sonora e velocidade de partícula na face frontal do metamaterial, dessa forma é caracterizada a impedância superficial. Com estes valores determinados de forma numérica, pode ser encontrado o coeficiente de reflexão, além da absorção sonora utilizando a Equação 2.7.

Figura 21 – Modelo numérico criado utilizando o *software* COMSOL.

(a) Principais geometrias que formam a malha.



(b) Geometria espaço enrolado $n=2$.



Fonte: O autor.

O modelo construído utiliza dois módulos para resolver os cálculos que descrevem o comportamento do material estudado, são eles: pressão acústica e acústica termo-viscosa. Além disso, a simulação considera como padrão que todas as paredes são rígidas e que não exista absorção sonora no interior do material, a faixa de frequência simulada variou

para cada caso, sendo compatível com a faixa de interesse do metamaterial estudado, geralmente entre 100 Hz e 800 Hz. Quando comparado com o modelo analítico, a simulação numérica permite com mais facilidade a obtenção de algumas informações, como o campo de pressão acústica ou velocidade de partícula para todo o domínio estudado. Assim, após resolvida a simulação numérica, é possível plotar o comportamento de algumas variáveis ao longo da geometria e de acordo com a frequência de interesse, possibilitando análises mais profundas, como, por exemplo, determinar a perda térmica no interior da perfuração do metamaterial.

O módulo pressão acústica é usado para determinar as variações de pressão em uma interface física, para a propagação de ondas acústicas em fluidos. Sendo apropriado para simulações no domínio da frequência com variações harmônicas do campo de pressão. Sua interface física resolve a equação de Helmholtz no domínio da frequência para algumas frequências, ou como uma auto frequência. O módulo pode ser utilizado em modelos acústicos que descrevem as interações entre estruturas e ondas acústicas. A pressão sonora p resolvida no módulo pressão acústica, representa as variações acústicas à pressão ambiente. Na ausência de fluxo, a pressão ambiente p_A é simplesmente a pressão estática absoluta (COMSOL, 2021).

A interface Acústica Termo-viscosa é usada para calcular as variações acústicas de pressão, velocidade e temperatura. Essa interface física é necessária para modelar com precisão a acústica em geometrias de pequenas dimensões, geralmente chamadas de microacústica. Perto das paredes, as perdas viscosas e a condução térmica tornam-se importantes, por existir uma camada limite. A interface física resolve as equações no domínio da frequência assumindo que todos os campos e fontes são harmônicos, além de assumir, por padrão, a ocorrência de acústica linear. Todavia, efeitos não lineares podem ser incluídos utilizando um recurso próprio do módulo. As equações definidas pelo módulo de acústica termo-viscosa são as equações linearizadas de Navier-Stokes, resolvendo as equações de continuidade, momento e energia. O modelo numérico resolve simultaneamente a pressão acústica p , a variação de velocidade acústica u (velocidade da partícula) e as variações de temperatura acústica T (COMSOL, 2021).

Por fim, o custo computacional deve ser considerado. Modelos muito complexos podem exigir que seja reduzido o refinamento da malha a fim de tornar viável sua resolução. Mudanças no grau de refinamento da malha podem modificar a qualidade do resultado processado, principalmente com o aumento da frequência. Alguns critérios podem ser seguidos para evitar erros, entre eles deve-se garantir que exista um número mínimo de elementos da malha por comprimento de onda. Outra estratégia para reduzir o custo de processamento está em reduzir a faixa de frequência calculada, ou aumentar o intervalo de incremento de cada frequência. Todas as simulações utilizadas neste estudo foram processadas com um computador que possui a seguinte especificação: processador AMD

Ryzen 5 3600, 16 GB de RAM, placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti.

3.3.1 Cavidade simples

As geometrias com apenas uma cavidade tem por objetivo otimizar o modelo numérico em situações que exitem apenas uma dimensão para os parâmetros da cavidade e perfuração para toda a estrutura. Por ter o máximo aproveitamento da amostra, ou seja, a área da seção transversal do tubo é igual à área da amostra, o resultado pode ser comparável ao valor obtido dos modelos teóricos.

Com objetivo de determinar as diferenças entre o refinamento das malhas do modelo numérico, foram construídas três geometrias com diferentes enrolamentos da cavidade ($n=2$, $n=3$ e $n=4$), todas com perfuração quadrada e demais parâmetros geométricos iguais (ver Figura 22). Foi selecionado a malha com maior refinamento disponível no COMSOL (Extremamente fina), sendo adicionado e comparado a utilização do refinamento extra, em todo o domínio de estudo que aumentou ainda mais o número de elementos, são eles Dividir o Lado mais Longo (SLS) e Refinamento Regular (RR). Comparando diretamente a mesma geometria com diferentes refinamentos é possível perceber que os elementos não são distribuídos de maneira uniforme, regiões com menores dimensões, como a perfuração, recebem elementos menores e em maior quantidade, além disso, de forma visual o grau de refinamento da malha fica evidente (Ver Figura 22a e Figura 22c). As informações sobre as geometrias analisadas está disponível no Quadro 2, com o aumento do número de graus de liberdade do modelo, eleva-se o custo computacional, representado pelo tempo de simulação. Todas as análises foram resolvidas para a faixa de frequência de 100 Hz a 600 Hz com incremento de 5 Hz.

Quadro 2 – Informações do modelo numérico de MMA com uma cavidade e malha extremamente fina.

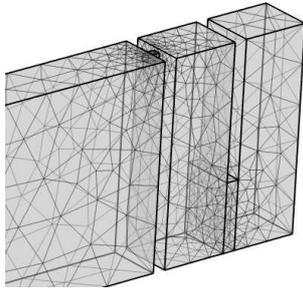
Enrolamento	Refinamento	Elementos	G. liberdade	Tempo sim.
n=2	-	7.404	29.359	1m59s
	SLS	24.218	94.035	9m15s
	RR	38.247	212.369	1h37s
n=3	-	8.758	38.632	2m29s
	SLS	28.599	120.956	11m58s
	RR	70.064	278.257	1h13m
n=4	-	9.251	42.380	2m33s
	SLS	30.395	132.947	12m22s
	RR	74.008	303.909	1h19

Fonte: O autor.

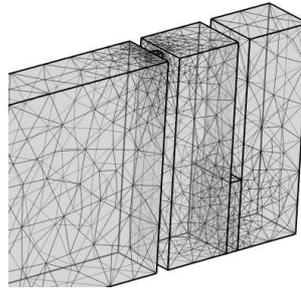
Os resultados das simulações para diferentes números de enrolamentos da cavidade e refinamentos da malha estão expostos na Figura 23. O comportamento das curvas com a mudança de refinamento foi semelhante para todos os enrolamentos. A malha sem refinamento obteve o pico de absorção sonora para a menor frequência, com a aplicação do refinamento SLS, a curva deslucou-se cerca de 10 Hz para frequências mais altas,

Figura 22 – Comparativo malha para execução da simulação para uma cavidade com diferentes enrolamentos ($n=2$, $n=3$ e $n=4$).

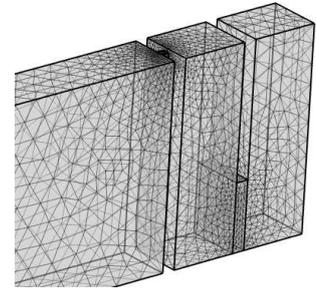
(a) $n=2$, sem refinamento.



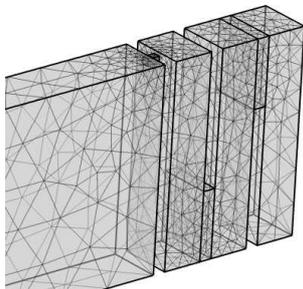
(b) $n=2$, refinamento SLS.



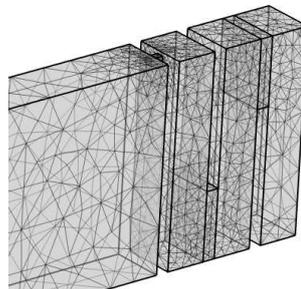
(c) $n=2$, refinamento RR.



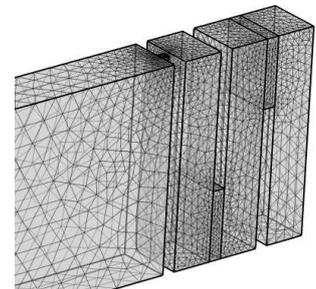
(d) $n=3$, sem refinamento.



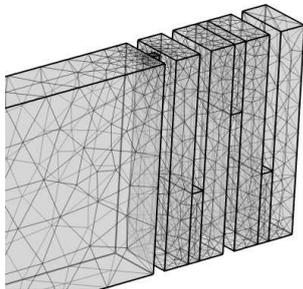
(e) $n=3$, refinamento SLS.



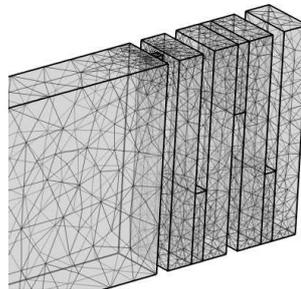
(f) $n=3$, refinamento RR.



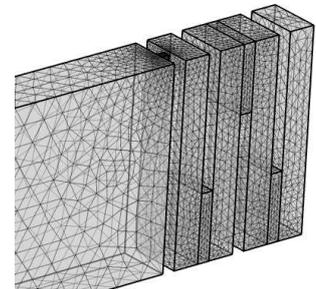
(g) $n=4$, sem refinamento.



(h) $n=4$, refinamento SLS.



(i) $n=4$, refinamento RR.



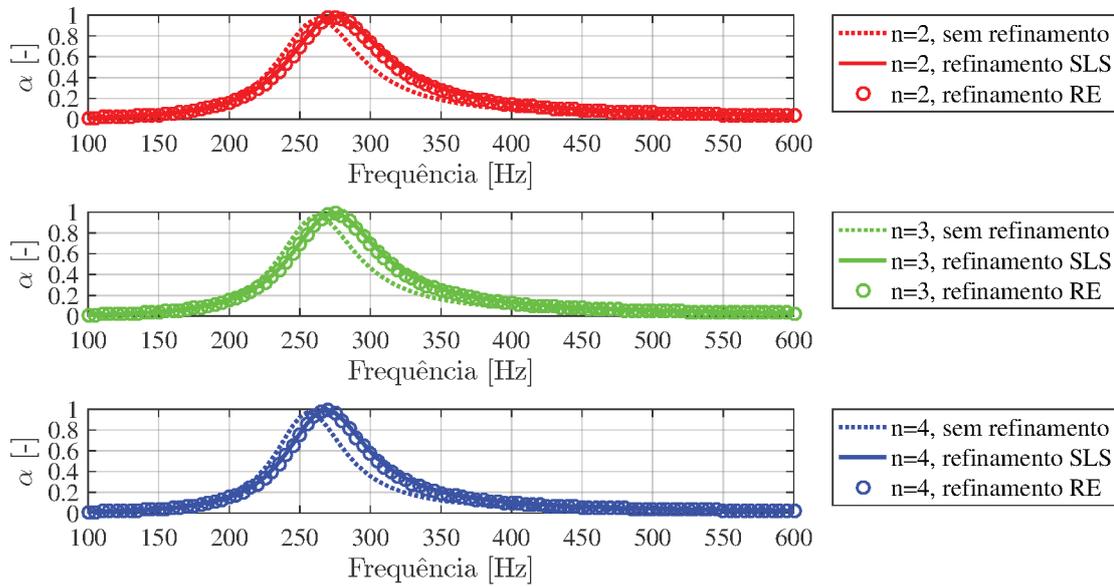
Fonte: O autor.

entretanto o refinamento com mais elementos (RR) não resultou em mudanças no resultado. A análise das curvas indica que não necessariamente o aumento do número de elementos resulta em diferenças no resultado, podendo então otimizar o custo computacional.

3.3.2 Cavidades compostas

As cavidades compostas são formadas pela combinação de pelo menos duas geometrias simples diferentes, podendo ser alterado entre as estruturas tanto as variáveis relacionadas com a cavidade como o grau de enrolamento e quanto os parâmetros de perfuração, como a geometria da perfuração ou as dimensões. Cavidades compostas geralmente são planejadas para atuarem com largura de banda de frequência de absorção maiores que as cavidades simples, justamente por permitirem que materiais sintonizados em diferentes frequências de trabalho sejam acoplados. O modelo numérico destas estruturas, assim

Figura 23 – Comparativo do coeficiente de absorção sonora para malhas com e sem refinamento e para cavidade com diferentes enrolamentos ($n=2$, $n=3$ e $n=4$).



Fonte: O autor.

como para as cavidades simples, também são construídos com aproveitamento de 100%. O aumento do número de cavidades, resulta no crescimento da área de seção transversal do tubo de impedância do modelo numérico. Dessa forma, os resultados são diretamente comparáveis com os valores obtidos nos modelos analíticos.

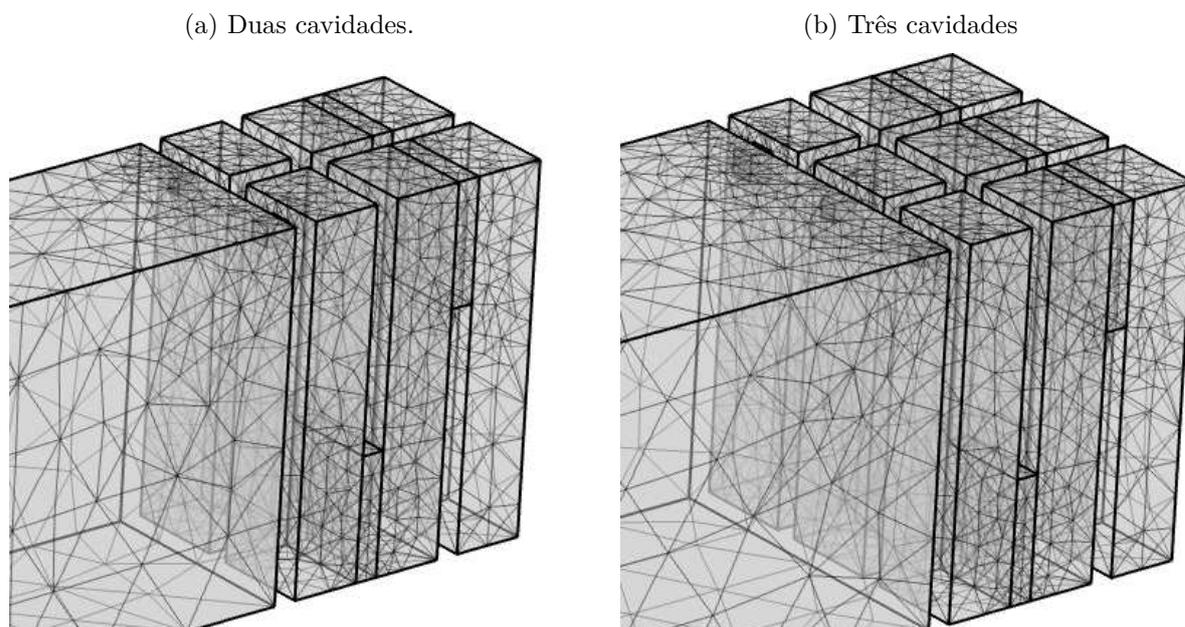
Foi estudado o efeito de diferentes malhas para duas geometrias, ambas com espaço enrolado $n=3$, a primeira composta por duas cavidades acopladas (ver Figura 24a), já a segunda é formada por três cavidades (ver Figura 24b). Todas as estruturas foram construídas com as mesmas dimensões, com exceção das perfurações cujos valores foram alterados entre as cavidades para com isso alcançar o pico de absorção em frequências diferentes. As informações correspondentes a cada malha processada foram unidas e estão demonstradas no Quadro 3. Devido ao tamanho e complexidade das geometrias, não foi possível refinar ainda mais a geometria para o processamento no computador utilizado, fato causado pelo limite de memória RAM do computador disponível.

Quadro 3 – Informações do processamento do modelo numérico de MMA com cavidades compostas.

Cavidade	Malha	Refinamento	Elementos	G. liberdade	Tempo sim.
Dupla	Extra fina	-	6.833	29.471	2m7s
	Extremamente fina	-	14.022	94.433	3m32s
	Extremamente fina	SLS	46.748	212.369	17m47s
Tripla	Extra fina	-	10.716	38.632	3m2s
	Extremamente fina	-	21.855	120.956	5m34s
	Extremamente fina	SLS	73.785	278.257	28m18s

Fonte: O autor.

Figura 24 – Malha utilizada no modelo numérico com cavidades compostas.



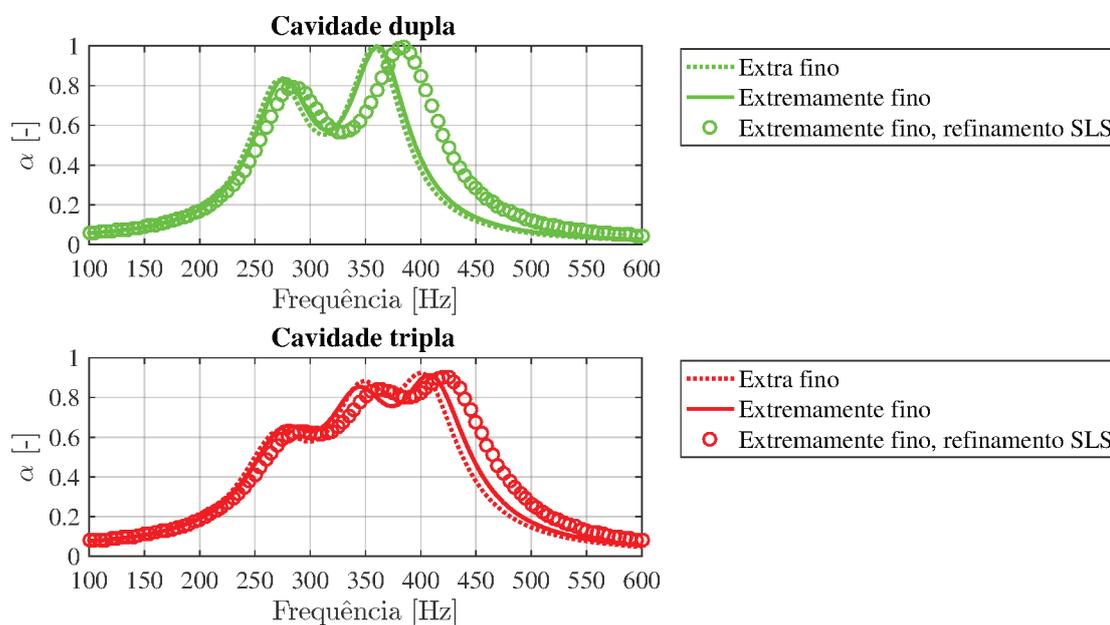
Fonte: O autor.

Os valores das curvas de absorção sonora, para as cavidades compostas, são demonstrados pela Figura 25. Houve algumas diferenças entre as curvas com alteração do nível de refinamento da malha. A malha "Extra fino" dentro o grupo, foi composta por menos elementos, e para ambas cavidades obteve picos de absorção para as menores frequências. A mudança para a malha "Extremamente fino", resultou em um leve deslocamento do pico de absorção para frequências mais altas, fato evidenciado pela curva com maior refinamento, sendo que o deslocamento para frequências mais altas foi de até 25 Hz. Devido ao custo computacional adicional das simulações com cavidades acopladas, para facilitar o dimensionamento das geometrias e a verificação dos modelos, é indicado que esta análise seja antecedida do processamento numérico para cada amostra individual, onde é possível elevar o refinamento sem atingir o limite computacional disponível.

3.3.3 Amostra completa

O modelo desenvolvido para a amostra completa replica em escala real a amostra construída e utilizada nos ensaios com o tubo de impedância. A estrutura é composta por oito cavidades simples, cujas dimensões variam de acordo com a amostra. Ensaio em que existe apenas uma frequência de absorção, geralmente todas as cavidades são idênticas, já para os casos em que o objetivo é a absorção sonora em maior largura de banda de frequência, podem existir duas ou mais variações entre as geometrias unitárias das células. O modelo numérico da amostra completa não possui aproveitamento unitário, deste modo pode haver diferenças que devem ser consideradas na comparação entre os resultados com o modelo analítico. Todavia, o aproveitamento segue o mesmo existente entre a amostra

Figura 25 – Comparativo da absorção sonora entre diferentes malhas para modelos com cavidades compostas.



Fonte: O autor.

manufaturada e o tubo de impedância utilizado no ensaio, deste modo o resultado da simulação para este modelo é mais facilmente comparável com os valores experimentais.

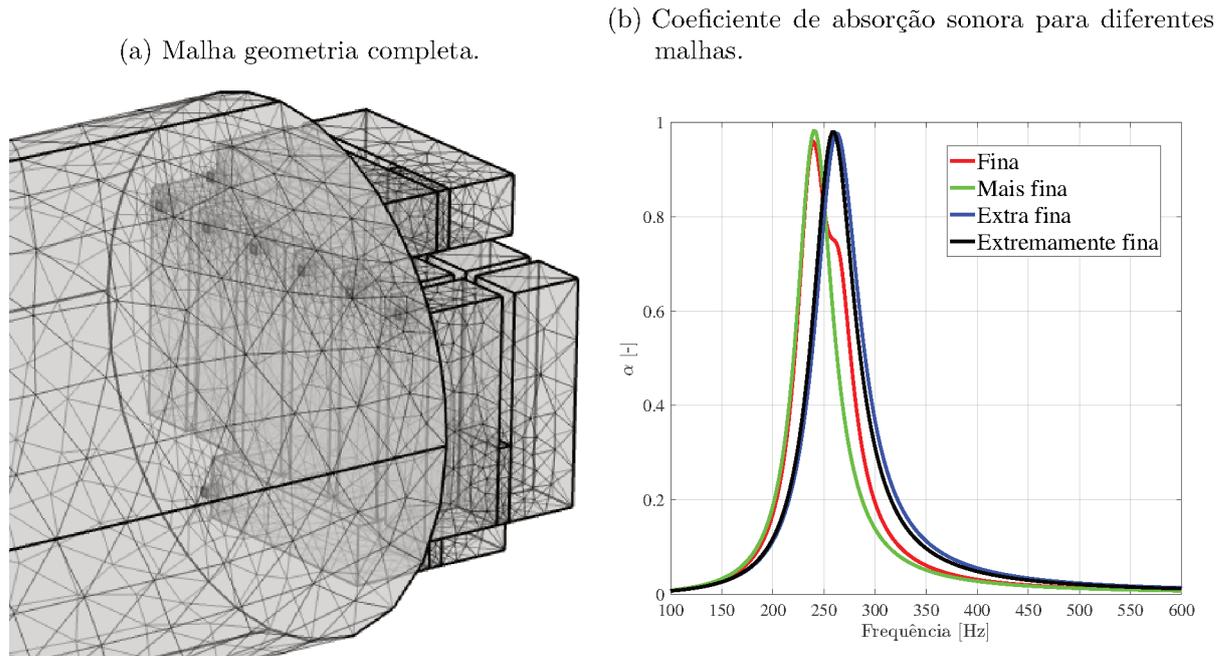
O Quadro 4 demonstra as informações para geração de diferentes refinamentos da malha utilizada no modelo numérico da amostra completa. A utilização de malhas com mais elementos foi impossibilitada devido ao limite da memória RAM do computador utilizado durante o estudo. As simulações foram calculadas para valores de frequência entre 100 Hz 600 Hz com incremento de 5 Hz. A geometria completa foi construída com oito cavidades e perfurações iguais, dispostas seguindo o distanciamento utilizado na amostra manufaturada (ver Figura 26a). As curvas de absorção sonora foram calculadas e estão demonstradas na Figura 26b. A curva vermelha, representando a malha menos refinada, demonstrou uma descontinuidade justificada por eventuais defeitos da malha, principalmente na região das perfurações. A elevação do refinamento alterou a frequência em que ocorre o pico de absorção em cerca de 20 Hz para frequências mais altas. O elevado custo computacional limita a utilização desta geometria, devendo ser utilizada após entendido o comportamento da célula individual. Maiores refinamentos e consequentes resultados mais precisos para a geometria completa, são inviabilizados para o processamento em computadores convencionais.

Quadro 4 – Informações do modelo numérico de MMA para a geometria completa.

Cavidades	Malha	Elementos	G. liberdade	Tempo sim.
n=2	Fina	9.864	43.472	1m35s
	Mais fina	18.154	77.986	3m27s
	Extra fina	37.758	158.554	8m51s
	Extremamente fina	85.106	263.165	17m13s

Fonte: O autor.

Figura 26 – Verificação da diferença do refinamento da malha para simulações numéricas.



Fonte: O autor.

3.4 Projeto e montagem das amostras

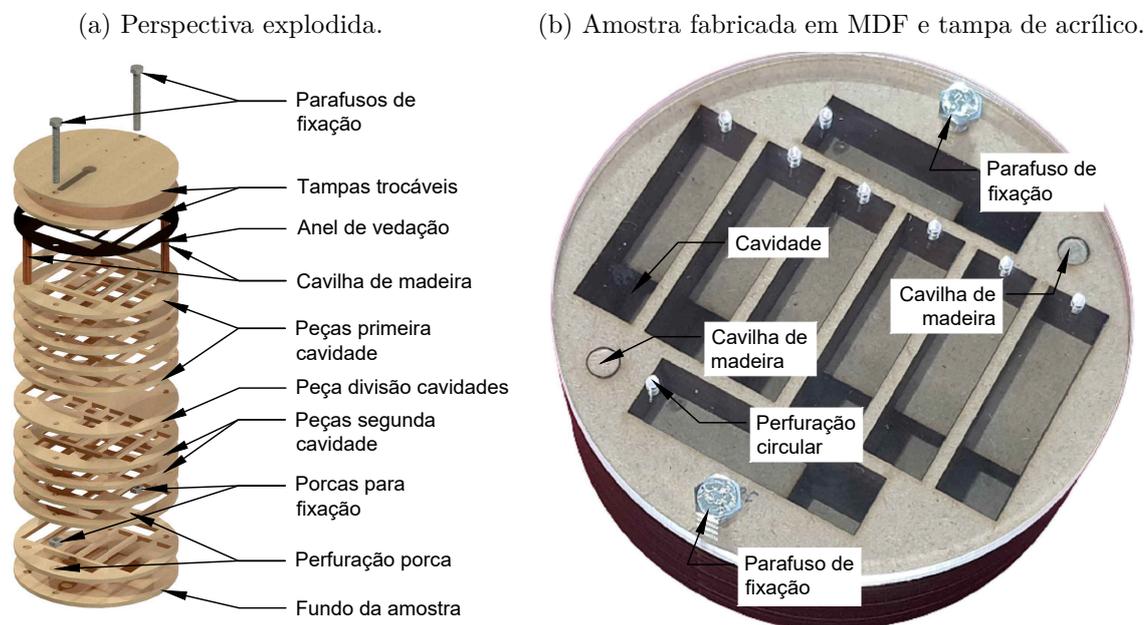
A fabricação das amostras foi realizada após uma etapa de verificação prática das características e confiabilidade dos equipamentos de processamento de materiais. A partir do modelo analítico validado numericamente, as peças para a amostra foram cortadas e construídas em MDF e acrílico, utilizando uma cortadora laser CNC. Todas as partes foram unidas seguindo a técnica desenvolvida de camadas justapostas, usando material adesivo líquido (cola) para conectar e vedar as estruturas.

3.4.1 Caracterização do metamaterial acústico

O modelo de metamaterial escolhido possui cavidades internas isoladas, com uma perfuração que tem a função de permitir a entrada da onda acústica. A Figura 27a demonstra a perspectiva explodida, sendo possível visualizar todas as camadas que compõe a amostra, além dos elementos de fixação e anel de vedação. A Figura 27b representa uma amostra manufaturada em MDF com diâmetro de 106,7 mm, utilizando acrílico como matéria-prima da tampa e perfil de perfuração circular, sem a utilização de anel de vedação

entre o corpo e a tampa.

Figura 27 – Amostra de metamaterial acústico produzido utilizando a técnica de corte a laser e camadas justapostas.



Fonte: O autor.

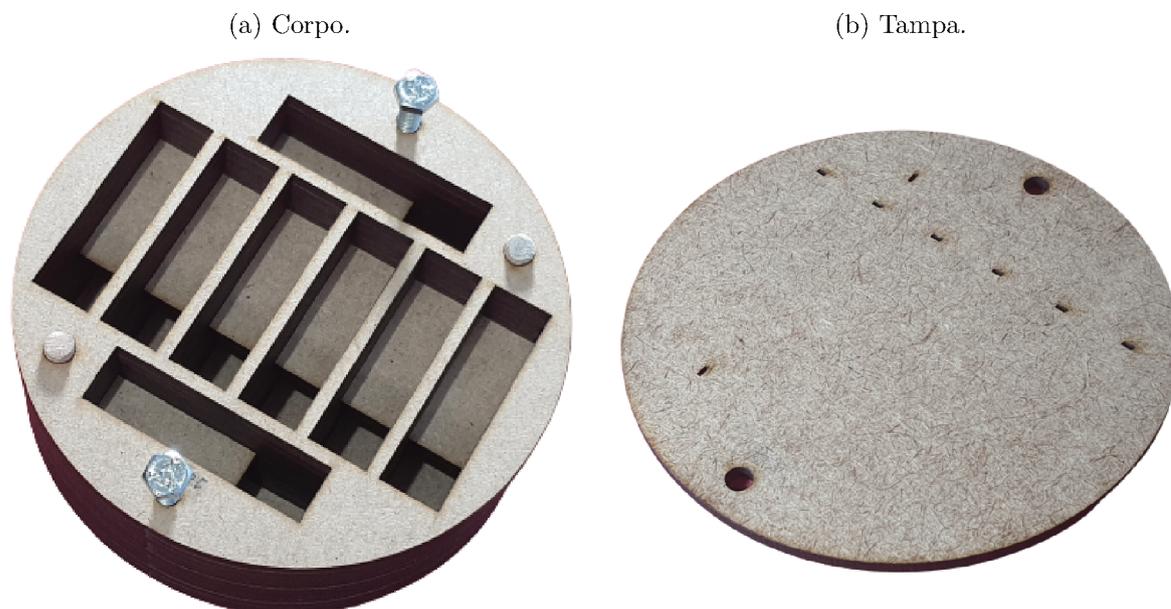
As amostras foram projetadas para serem construídas utilizando o método do corte a laser e camadas justapostas, desse modo para obter melhores vantagens da técnica construtiva, as amostras são projetadas em duas partes, são elas o corpo e a tampa. O corpo (ver Figura 28a) é estruturado e fixado com auxílio de uma cavilha de madeira, também existe cola entre cada camada, visando eliminar a ocorrência de vazamento acústico entre as cavidades. Por ser colado, o corpo não possibilita a mudança das suas camadas, dessa forma, uma vez montada, os parâmetros que dependem das dimensões internas das cavidades não podem ser alterados.

Por outro lado, a tampa (ver Figura 28b) é fixada ao corpo com auxílio de parafusos, é na tampa onde ficam localizadas as perfurações. Por ser o local onde efetivamente ocorrem os maiores efeitos de dissipação sonora, as mudanças das propriedades das tampas possibilitam comportamentos muito distintos entre as amostras montadas. Entre o corpo e a tampa existe um anel de vedação feito em borracha com dimensão de 1 mm, esta estrutura visa minimizar os vazamentos entre a junção dessas duas partes da amostra.

3.4.2 Controle preliminar do processo de manufatura

A construção das amostras de metamateriais acústicos foi precedida por algumas etapas relevantes, entre elas a determinação das fontes de erros e imperfeições do processo de manufatura. O primeiro item investigado foi a imperfeição das paredes da matéria-prima devido ao processo de corte, fato que resulta no aspecto queimado do acabamento das

Figura 28 – Parte da amostra de metamaterial acústico fabricada em madeira MDF utilizando a técnica de corte a laser e camadas justapostas.



Fonte: O autor.

cortes. Para a investigação foram construídas três amostras, para avaliar a precisão e o consumo de material devido ao processo de corte a laser (ver Figura 29a), com os materiais utilizados para a construção dos metamateriais (MDF, acrílico e aço carbono). As amostras foram planejadas com cortes retangulares de dimensões fixas, porém a distância entre cada corte foi variando, partindo de 5 mm até a distância de 0,8 mm. A principal distância de interesse é 3 mm, valor utilizado para o parâmetro b_0 dos metamateriais construídos. As aferições das dimensões das amostras foram realizadas com paquímetro e micrômetro, cujas especificações estão expressas no Quadro 5. As análises dos resultados indicaram que existe um consumo de material (ver Figura 29b), totalizando aproximadamente 0,13 mm. Assim, para que o material resulte com a distância entre dois cortes com 3 mm, deve-se projetar com 3,13 mm. O efeito foi identificado para as três matérias prima analisadas.

Quadro 5 – Equipamentos utilizados para aferir as amostras.

Equipamento	Marca	Modelo	Tipo	Escala de medição
paquímetro	mtx	3163159	analógico	0,02 mm
micrômetro	mtx	3172559	analógico	0,01 mm

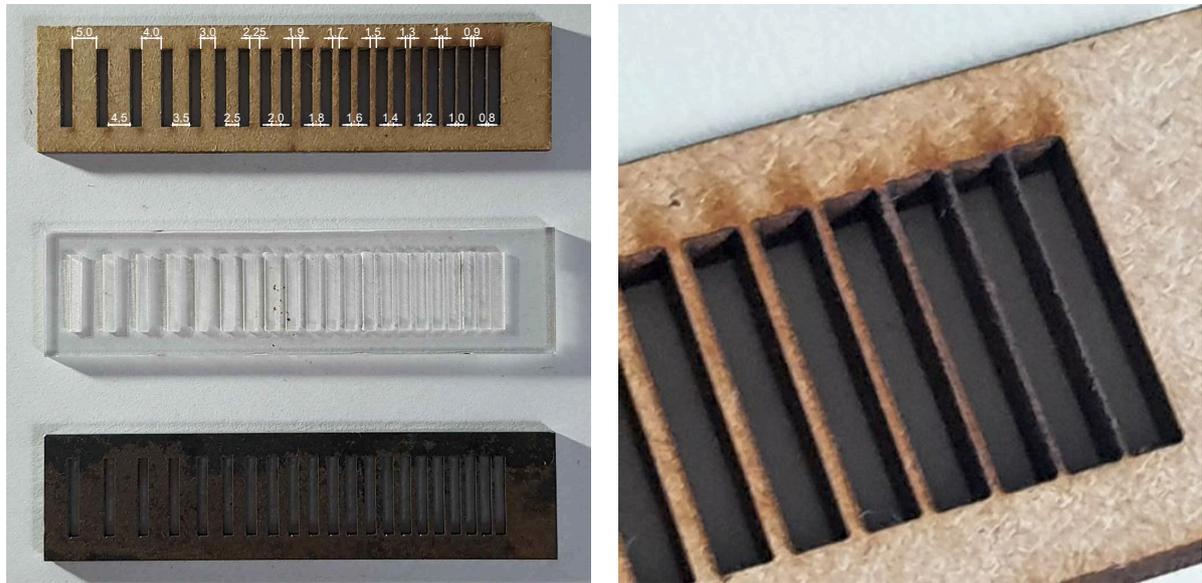
Fonte: O autor.

Os testes referentes à precisão e qualidade das perfurações foram realizados para três matérias-primas, avaliando defeitos nos cortes, principalmente referente a precisão de microperfurações (ver Figura 30). Foram projetadas e construídas geometrias contendo os três tipos de perfurações utilizadas no estudo (circular, quadrada e fenda). As perfurações do tipo circular foram variadas no parâmetro diâmetro. Para perfuração quadrada, a lateral foi variada. Já para a perfuração fenda, foi mantido constante a largura da fenda

Figura 29 – Peças projetadas e manufaturadas, em diferentes materiais com 3 mm de espessura.

(a) Amostras em MDF, acrílico e aço carbono.

(b) Detalhamento do consumo de material.



Fonte: O autor.

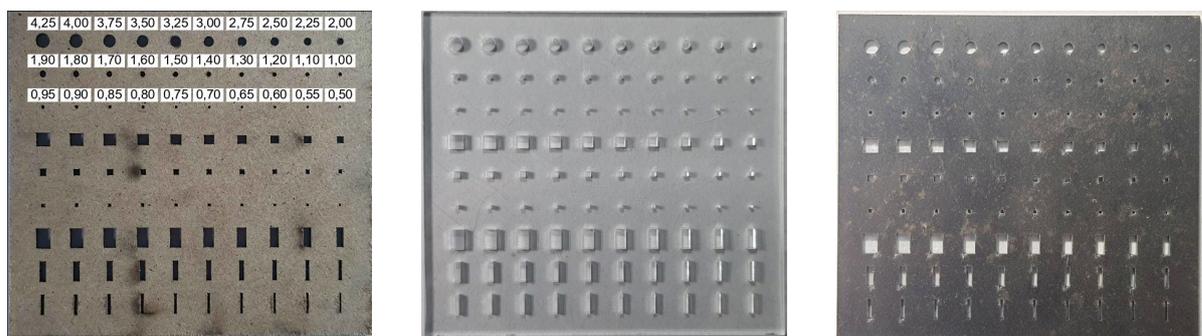
(L_f) e modificado o parâmetro d_f . Todas as perfurações tiveram as dimensões variadas em três linhas, partindo de 4,25 mm até 2,00 mm, com decréscimo de 0,25 mm. Na sequência, dimensão de 1,90 mm até 1,00 mm, com variação de 0,10 mm. Por fim, 0,95 mm até 0,50 mm, reduzindo 0,05 mm, as indicações das dimensões das perfurações utilizadas estão expressas na Figura 30a. Todas as perfurações das peças fabricadas foram mensuradas para os três materiais estudados. Foi constatado o consumo adicional de material devido ao processo de corte a laser, em cerca de 0,13 mm. Para contornar esta característica, foi acrescido este valor às dimensões das estruturas de metamaterial na fase de projeto, para que o resultado da amostra manufaturada obtenha a dimensão planejada.

Figura 30 – Peças utilizadas para avaliar o processo de manufatura de diferentes perfurações para diferentes materiais.

(a) MDF.

(b) Acrílico.

(c) Aço carbono.



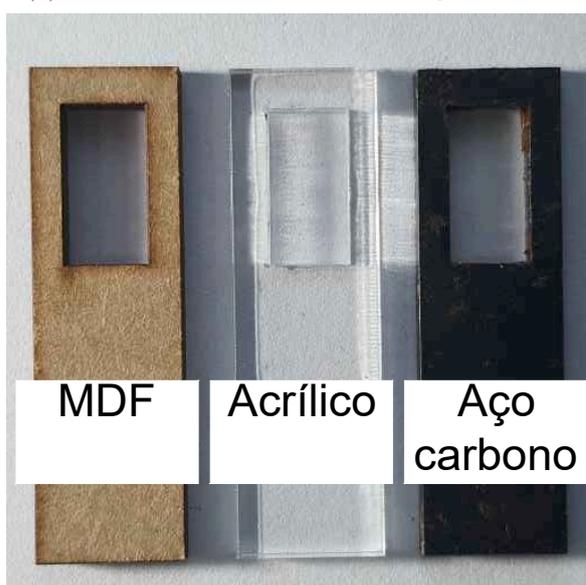
Fonte: O autor.

Por fim, também foram analisados os tipos de insumos utilizados para o processo

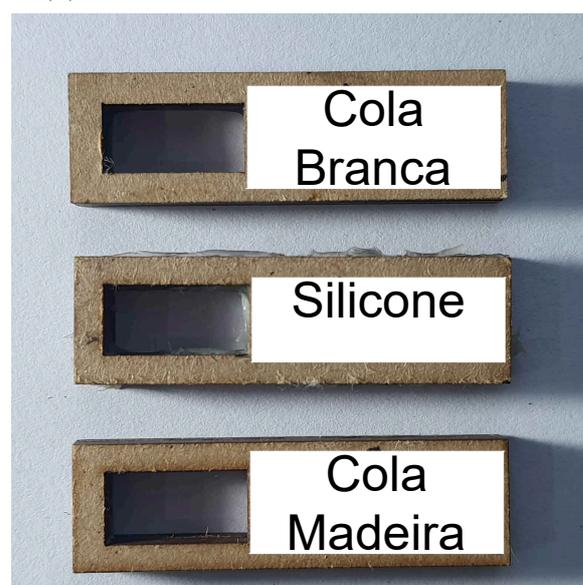
de colagem das camadas. Para o estudo, foram projetadas e manufaturadas amostras nos três materiais utilizados (ver Figura 31a). Os testes de colagem ocorreram para três diferentes fluidos adesivos (ver Figura 31b), são eles: cola branca, silicone e adesivo PVA para madeira. Todos obtiveram resultados positivos quanto ao objetivo principal, unir as camadas e reduzir vazamentos. Entretanto, o silicone mostrou-se de difícil manuseio, resultando em uma menor qualidade final, ocorrido pelo aspecto grosseiro do material. Aliado a isso, a composição do silicone possui solventes voláteis, necessitando da utilização de máscara facial para a manipulação, características que tornaram o elemento menos atrativo para a utilização, principalmente para o processo de colagem com amostras de MDF e acrílico. A cola branca e adesivo PVA para madeira apresentaram desempenho semelhantes, principalmente no tempo de secagem, facilidade e segurança de manipulação. Também apresentaram qualidade final equivalentes. Diante disso, para a construção das amostras em MDF e acrílico foi selecionado a cola branca como fluido adesivo.

Figura 31 – Peças manufaturadas por meio do corte a laser para avaliar o processo de colagem das camadas.

(a) Amostras em MDF, acrílico e aço carbono.



(b) Amostras em MDF com diferentes colas.



Fonte: O autor.

3.4.3 Corte e montagem das amostras

As amostras de metamateriais acústicos do tipo espaço enrolado são construídas ao empilhar camadas de peças cortadas utilizando tecnologia laser. As especificações técnicas da máquina cortadora a laser utilizada para produção das amostras são demonstradas no Quadro 6. Para a construção das geometrias utilizadas no estudo, existem quatro diferentes peças que compõem as cavidades, além do anel de vedação em borracha e o painel perfurado (ver Figura 32). O fundo da amostra (ver Figura 32a), tem função de evitar que ocorra vazamento na parte final do metamaterial, além de deixar uma folga para o parafuso

não encostar no porta-amostra do tubo de impedância durante os ensaios. Importante destacar que esta peça é fixada com cola e um par de cavilhas de madeira, o parafuso não participa do acoplamento. As cavidades são formadas ao empilhar as peças, indicadas pela Figura 32c, entretanto a primeira peça que forma a cavidade é diferente, como mostra a Figura 32b, esta tem a função de abrigar duas porcas sextavadas, responsáveis pela fixação do sistema e principalmente do painel microperfurado. A separação entre as cavidades é desempenhada pela peça indicada pela Figura 32d, para MMA com dois espaços enrolados ($n=2$), onde existe apenas uma na amostra. No entanto, para o grau de enrolação 3 e 4 são necessárias duas e três peças, respectivamente. O anel de vedação, construído em borracha com 1 mm de espessura (ver Figura 32e) é posicionado entre a amostra e o painel microperfurado (ver Figura 32f), a fixação destes elementos ocorrem exclusivamente por dois parafusos, deste modo existe a possibilidade da alteração destes elementos a fim de adquirir características diferentes para a amostra.

Quadro 6 – Especificação técnica da cortadora laser utilizada para fabricação das amostras.

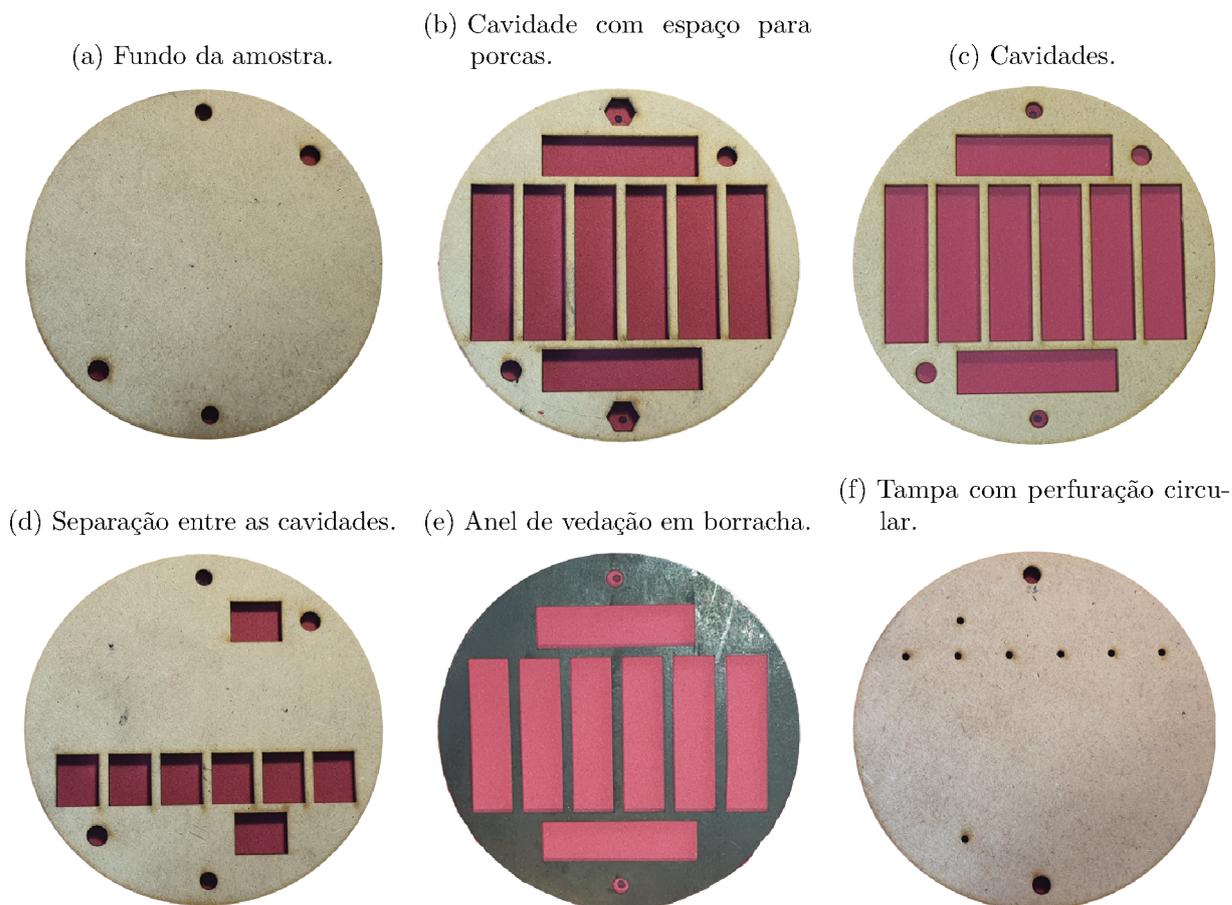
Cortadora laser	
Modelo	1390
Marca	Vesta
Tipo do laser	CO_2
Potência do laser	100 W
Área de trabalho	1300 mm x 900 mm
Precisão do feixe do laser	0,01 mm
Velocidade de corte	0 - 3600 mm/min

Fonte: O autor.

Entre cada camada é espalhada cola branca com auxílio de um pincel. Duas cavilhas de madeira transpassam toda a estrutura, sendo fixadas também com a mesma cola. A função principal das cavilhas é restringir a rotação das camadas, principalmente durante a secagem da cola, deste modo é garantido o alinhamento entre as estruturas. Após sobrepostas todas as camadas, antes da cola secar, deve-se retirar o excesso de fluido com o pincel. Finalizado o processo de secagem, a cola branca torna-se uma película com características visuais próximas ao plástico, assim este material além de evitar a ocorrência de vazamento acústico no interior das cavidades, também protege a superfície dos efeitos nocivos da umidade e agentes biológicos. Por fim, dois parafusos são utilizados para prender o painel frontal microperfurado, sendo possível projetar e manufaturar novas peças, alterando significativamente o desempenho do metamaterial acústico. O processo de construção através do empilhamento das peças é demonstrado pela Figura 33.

O procedimento de montagem ocorre de forma semelhante para peças construídas a partir de outras matérias-primas. No Apêndice A, a Figura 84 demonstra as etapas para construção do metamaterial de acrílico com $n=2$. Para este material, também foi utilizada cola branca para fixar as peças, considerados os resultados observados nos testes

Figura 32 – Camadas individuais utilizadas para montagem das amostras.



Fonte: O autor.

executados em amostras simplificadas (ver Figura 31). A única característica negativa observada, quanto ao uso deste tipo de cola para as peças em acrílico, está na característica visual, após completamente seco, a amostra as camadas não permanecem totalmente transparentes, contudo não foi identificada relação do aspecto visual com o desempenho acústico da amostra.

3.5 Ensaios no tubo de impedância

Os ensaios foram realizados seguindo os procedimentos descritos na norma ISO:10534-2 (1998). O tubo de impedância disponível no LVA (Laboratório de Vibrações e Acústica), tem seção transversal circular com diâmetro interno de 107 mm. O tubo de impedância é um equipamento capaz de determinar algumas características acústicas da amostra, como o coeficiente de absorção sonora de incidência normal e a razão de impedância acústica.

A cadeia de sinal do aparato experimental está ilustrado na Figura 34. A amostra do metamaterial é fixada em uma extremidade do tubo de impedância e ondas planas são geradas por uma fonte sonora na extremidade oposta, o sinal utilizado pode ser do tipo: aleatório, pseudo-aleatório ou *chirp*. As pressões sonoras P1 e P2 são medidas

Figura 33 – Processo de montagem de amostras de espaço enrolado, $n=2$ em MDF.

(a) Fundo da amostra.

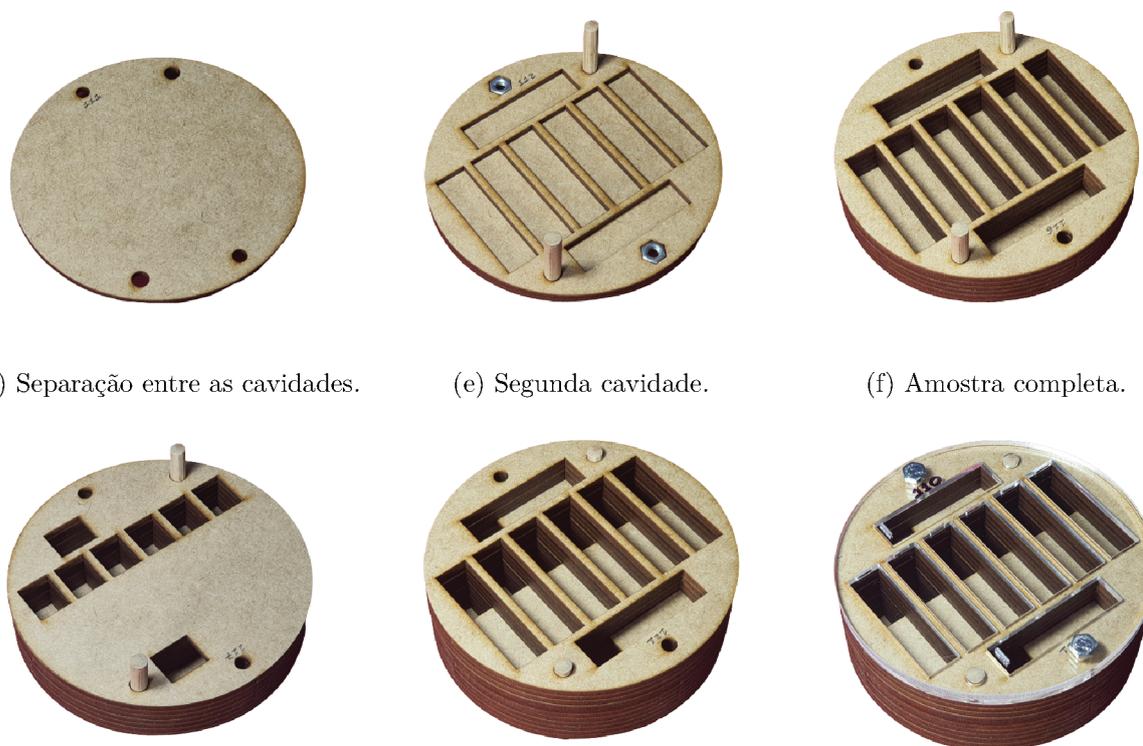
(b) Cavilhas e porcas de fixação.

(c) Primeira cavidade.

(d) Separação entre as cavidades.

(e) Segunda cavidade.

(f) Amostra completa.



Fonte: O autor.

por microfones (A e B) em dois locais próximos à amostra. Na sequência, a função de transferência acústica complexa é determinada entre os dois microfones ($H_{1,2}^I$), como demonstrado na Equação 3.1 (ISO:10534-2, 1998).

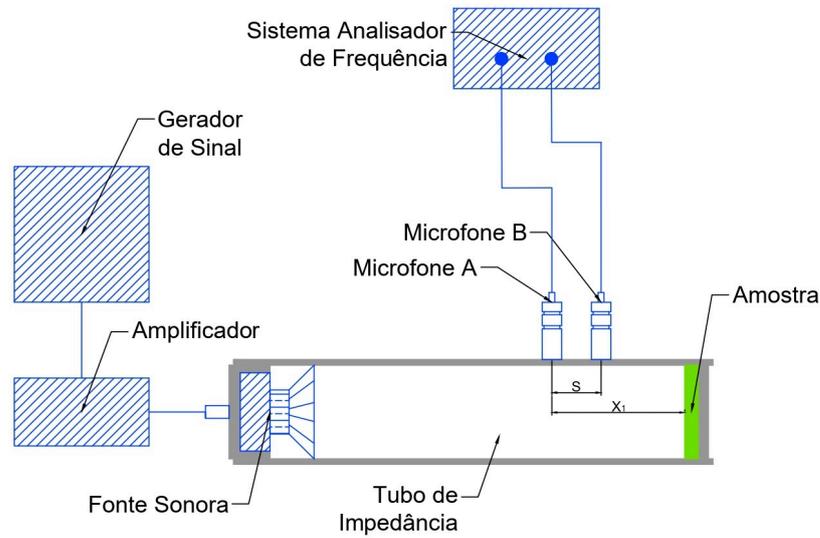
$$H_{1,2}^I = \frac{P_1}{P_2}. \quad (3.1)$$

Os valores medidos são sensíveis, podendo originar erros de medições devido à diferença de fase entre os microfones, a norma ISO:10534-2 (1998) especifica um procedimento de correção, para isso é determinada uma nova função de transferência ($H_{1,2}^{II}$) seguindo os mesmos procedimentos de ensaio. Contudo, são trocadas as posições dos microfones, o microfone 2 ocupa a posição do microfone 1 e o microfone 1 substitui o local do microfone 2, é então calculada uma nova função de transferência corrigida como demonstrado com a Equação 3.2,

$$H_{cor} = \left(\frac{H_{1,2}^I}{H_{2,1}^{II}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.2)$$

O valor da função de transferência corrigido é utilizado para calcular o coeficiente de reflexão com a Equação 3.3,

Figura 34 – Cadeia de sinal da bancada experimental para análise com tubo de impedância.



Fonte: O autor.

$$R_{cor} = \frac{H_{cor} - e^{-jk_0S}}{e^{jk_0S} - H_{cor}} e^{j2k_0x_1}, \quad (3.3)$$

onde k_0 é o número de onda, S e x_1 são as distâncias do posicionamento dos microfones, como demonstrado na Figura 34. Na sequência o coeficiente de absorção de incidência normal pode ser determinado utilizando a Equação 3.4,

$$\alpha_{cor} = 1 - |R_{cor}|^2. \quad (3.4)$$

A partir das dimensões do tubo de impedância utilizado para os ensaios (0,107 m), distância entre os microfones ($s = 0,08m$) e considerando a temperatura do ar em 20°C ($c_0 = 343m/s$), conforme as Equações 3.5, 3.6 e 3.7,

$$f_{min} > \frac{0,1c_0}{2s}, \quad (3.5)$$

$$f_{max} < \frac{0,8c_0}{2s}, \quad (3.6)$$

$$f_c = \frac{1,84c_0}{\pi d}, \quad (3.7)$$

sendo d o diâmetro do tubo de impedância. A máxima frequência operada é representada pela frequência f_c com valor de 1879 Hz. O equipamento é capaz de operar com

confiabilidade para a região com frequências maiores que 214 Hz e menores que 1.716 Hz (GERGES, 2000).

3.6 Equipamentos e programas computacionais

Para o desenvolvimento da pesquisa serão necessários os seguintes materiais e *softwares*:

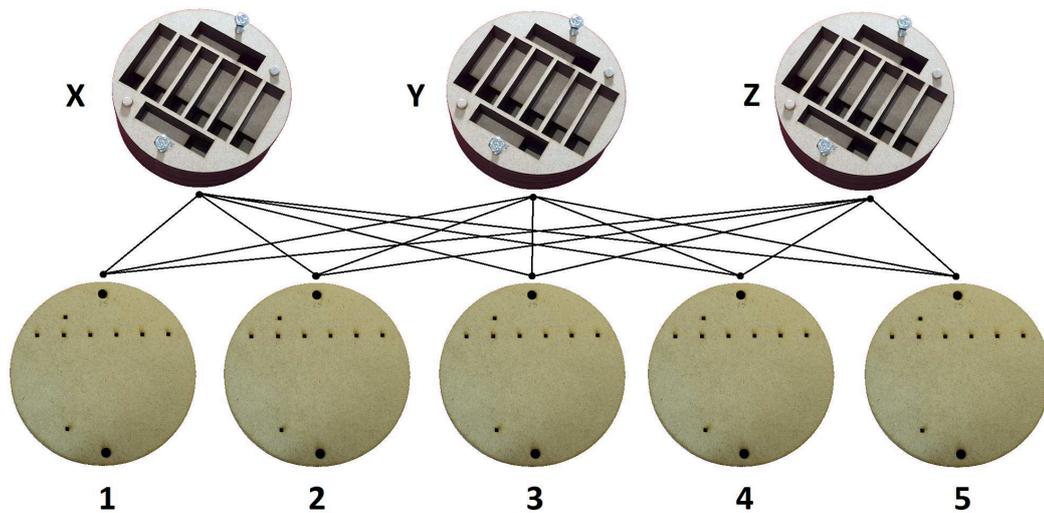
- *Software* Autocad;
- *Software* COMSOL;
- *Software* Matlab;
- Microfones;
- Cabos;
- Calibrador de microfones;
- Analisador de sinais;
- Tubo de impedância;
- Amplificador;
- Gerador de sinais;
- Computador;
- Máquina de corte laser;
- Chapas de matéria-prima, parafusos e cola;
- Outros.

3.7 Variação das amostras devido ao processo produtivo

As verificações das variações das características das amostras devido ao processo produtivo e de montagem serão realizadas utilizando o controle estatístico de processo. Para isso um conjunto de procedimentos serão seguidos a fim de entender e avaliar estatisticamente o processo de manufatura das amostras.

O método de CEP exige que as amostras sejam mensuradas repetidas vezes, por operadores distintos, para reduzir vieses dos observadores. Os ensaios para avaliar a variação do processo de manufatura dos MMA foram planejados para serem aplicados a quinze amostras idênticas. Os metamateriais acústicos produzidos com a técnica de corte a laser e camadas justapostas permitem a alteração do painel frontal microperfurado. Desse modo, foram projetadas três estruturas que compõem as oito cavidades de espaço enrolado (corpo da amostra), nomeadas respectivamente de X, Y e Z, e cinco painéis com perfurações circulares (tampa da amostra), nomeadas sequencialmente pelos números de 1 a 5. Todas as estruturas construídas com exatas dimensões, montadas no mesmo momento, utilizando as mesmas condições. As amostras avaliadas nos ensaios de CEP são constituídas a partir da combinação de um corpo (X, Y ou Z) com uma tampa (1, 2, 3, 4 ou 5), formando o total de quinze amostras, assim como indicado pela Figura 35.

Figura 35 – Formação das amostras utilizadas para o estudo de variação devido ao processo produtivo.



Fonte: O autor.

As amostras foram avaliadas utilizando um aparato de tubo de impedância. O ensaio foi repetido por cinco avaliadores de forma independente. A ordem dos ensaios foi definida por critério aleatório para reduzir vieses de medição, utilizando o site: <https://www.random.org/lists/> e sendo definida a ordem de avaliação descrita pela Tabela 1.

Tabela 1 – Ordem das amostras para realização dos ensaios de absorção acústica para o estudo de variação devido ao processo produtivo.

Ordem	Operador				
	1	2	3	4	5
1	Z5	X2	Z1	Z5	Z1
2	Y4	X1	X2	Z2	Y3
3	X5	Z2	X4	X4	Y2
4	Z2	Z4	Z4	Z3	Y1
5	X4	X4	Z2	Z1	Y4
6	Y1	Y5	X3	Y4	X5
7	X1	Y4	Y4	X5	X3
8	Y3	X3	Z3	X3	Z2
9	Z3	Y2	Z5	Y3	Z3
10	Z1	Z5	Y1	Z4	Z4
11	Y5	Y1	Y2	Y5	X2
12	Y2	X5	Y3	X2	X1
13	X3	Z1	X1	X1	X4
14	X2	Z3	X5	Y1	Z5
15	Z4	Y3	Y5	Y2	Y5

Fonte: O autor.

Finalizada a etapa de ensaios de absorção sonora, utilizando o aparato de tubo de impedância, foram processadas as 75 curvas de coeficiente de absorção sonora e as informações necessárias para o estudo estatístico foram retiradas destes resultados. Foi eleito como parâmetro de controle o valor da frequência em que ocorre o pico de absorção,

por ser a variável que melhor representa a amostra e que geralmente é utilizada para o projeto de novos metamateriais. Para as quinze amostras, repetidas por cinco operadores, foram coletados e tabelados os valores para os três parâmetros utilizados no estudo do CEP, assim como indicado a Tabela 2. Os valores serviram como base para a aplicação das ferramentas de controle estatístico, e formação das curvas de controle do processo. Com isso, é possível perceber, de forma visual, a variação do processo produtivo.

Tabela 2 – Modelo utilizado para aplicação do CEP para os parâmetros das amostras.

Amostra	Operador					Média	Amplitude
	1	2	3	4	5		
X1							
X2							
X3							
X4							
X5							
Y1							
Y2							
Y3							
Y4							
Y5							
Z1							
Z2							
Z3							
Z4							
Z5							
Soma							

Fonte: O autor.

4 Investigação Preliminar das Características das Amostras

Neste capítulo, buscou-se compreender como as propriedades de absorção acústica, dos materiais que compõe a geometria de estudo, modificam a curva de desempenho das amostras de metamateriais acústicos. Além disso, foi investigado os efeitos de vazamentos do som e absorções adicionais, originados pelo processo de manufatura das amostras, com objetivo de entender e melhorar os modelos teóricos. Na sequência, o fator de aproveitamento das amostras foi analisado. Este parâmetro tem origem na limitação em projetar cavidades acústicas retangulares em amostras com secção transversal circular. Dessa forma foi explorado os efeitos no resultado da variação do fator de aproveitamento da amostra, buscando soluções por meio de um fator de correção para mitigar estes efeitos. Por fim, foi estudada a eficácia da utilização do anel de vedação, construído em borracha, no comportamento dos resultados das amostras de metamateriais acústicos.

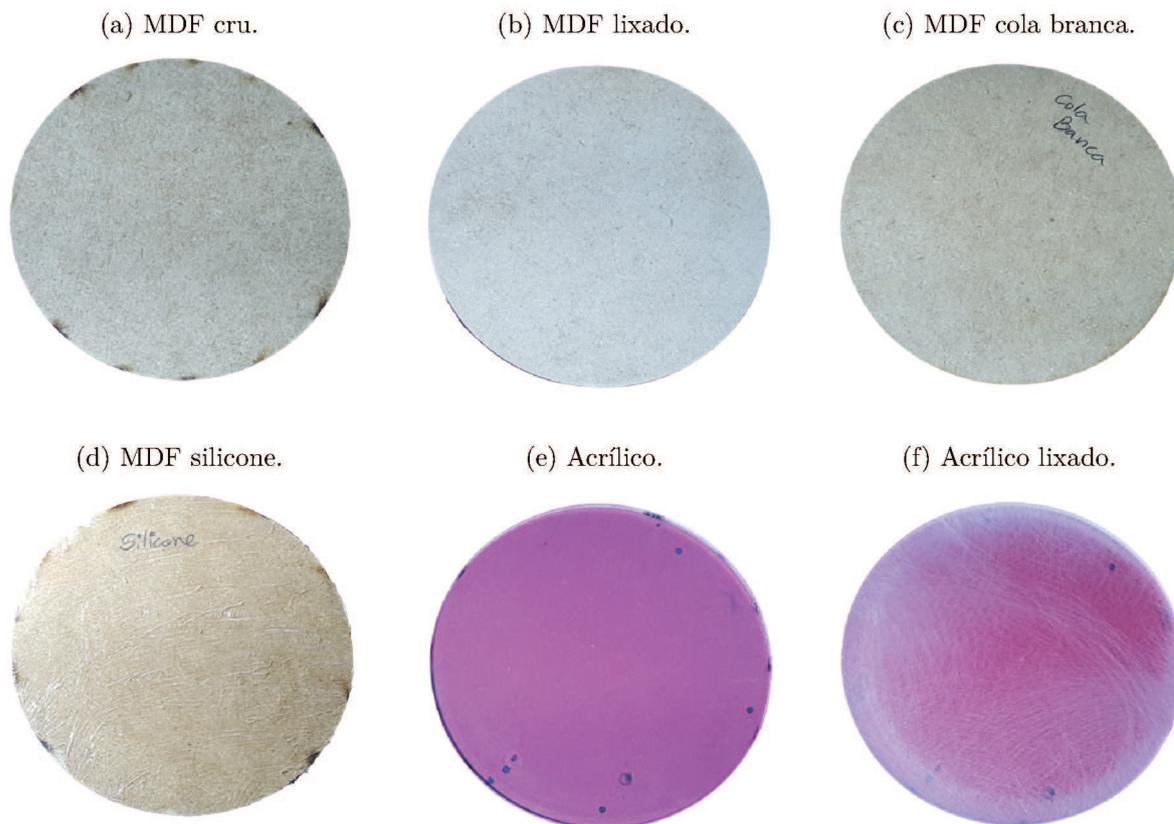
4.1 Avaliação da absorção sonora dos elementos construtivos

Foi avaliado o valor da absorção sonora dos principais materiais utilizados como matéria-prima. Também foi investigado o efeito de algumas condições que modificam a camada superficial dos materiais, como o emprego de cola branca sobre a superfície, silicone e o processo de lixamento. Para os ensaios, foram manufaturadas peças circulares com diâmetro de 107 mm (ver Figura 36). O valor da absorção foi determinado utilizando o aparato do tubo de impedância.

A absorção sonora devido ao tipo de material é relevante para entender o comportamento dos resultados de estruturas complexas. Os modelos teóricos desconsideram geralmente os efeitos das dissipações dos materiais que constituem a estrutura. Entretanto, dependendo do valor da absorção sonora do material, podem ocorrer alterações das características dos resultados.

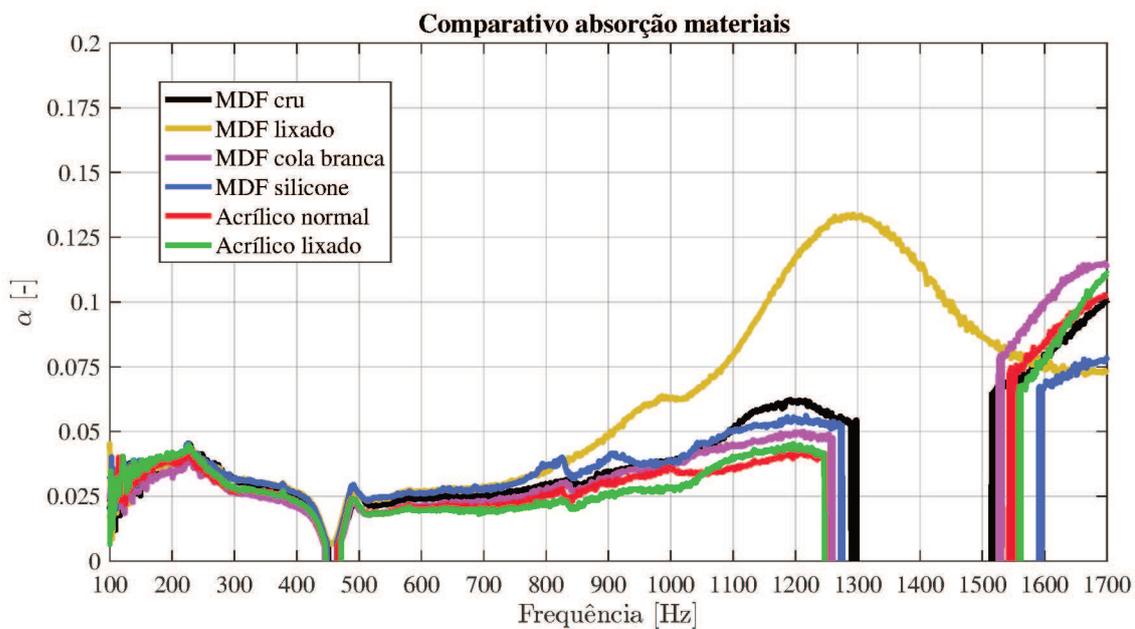
As curvas de absorção sonora para as amostras, estão demonstradas pela Figura 37. Existiu semelhança entre os valores de α para os materiais analisados, com máximo de 4% e mínimo de 1%, para a faixa de frequência entre 100 Hz e 800 Hz. Com isso, para esta faixa de frequência, os resultados demonstraram existir pouca variação da absorção sonora com a frequência, podendo ser simplificado por um valor constante. Para frequências mais altas, acima de 800 Hz, é possível identificar o crescimento do valor da absorção sonora. A amostra de MDF lixado (curva amarela) obteve maior valor de α , cerca de 13,5% em 1.300 Hz.

Figura 36 – Amostras utilizadas para a avaliação da absorção do material.



Fonte: O autor.

Figura 37 – Absorção sonora para diferentes materiais.



Fonte: O autor.

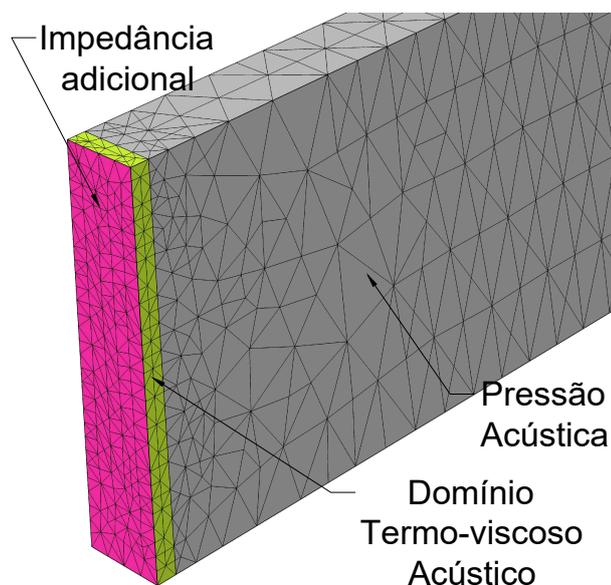
4.2 Investigação da absorção no interior das cavidades

Os modelos teóricos que descrevem o comportamento dos metamateriais acústicos do tipo espaço enrolado, geralmente consideram que as estruturas são formadas por paredes rígidas, sem vazamento acústico ou qualquer outro efeito dissipativo no interior das cavidades. Estas características já foram discutidas na seção anterior e podem ser sintetizadas ao analisar a Equação 2.6, a impedância total do metamaterial (\tilde{Z}_s) é o resultado da soma das impedâncias da perfuração (\tilde{Z}_p) e da cavidade (\tilde{Z}_c). O modelo teórico não considera possíveis efeitos dissipativos adicionais no interior da cavidade. Vale reforçar que o valor da impedância acústica de uma superfície tem relação direta com a absorção sonora, fato sintetizado pela Equação 2.7.

4.2.1 Impedância superficial

Foi avaliada a correspondência dos resultados do modelo numérico com a teoria básica de acústica. Com isso garante que não existem problemas com a configuração da simulação. A Figura 38 ilustra a malha utilizada para simulação no COMSOL, além de demonstrar o domínio da pressão acústica onde o campo acústico é gerado, o domínio termo-viscoso onde as dissipações são calculadas e a superfície onde foi adicionada a absorção adicional.

Figura 38 – Malha utilizada para a simulação numérica para obter o coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância superficial.

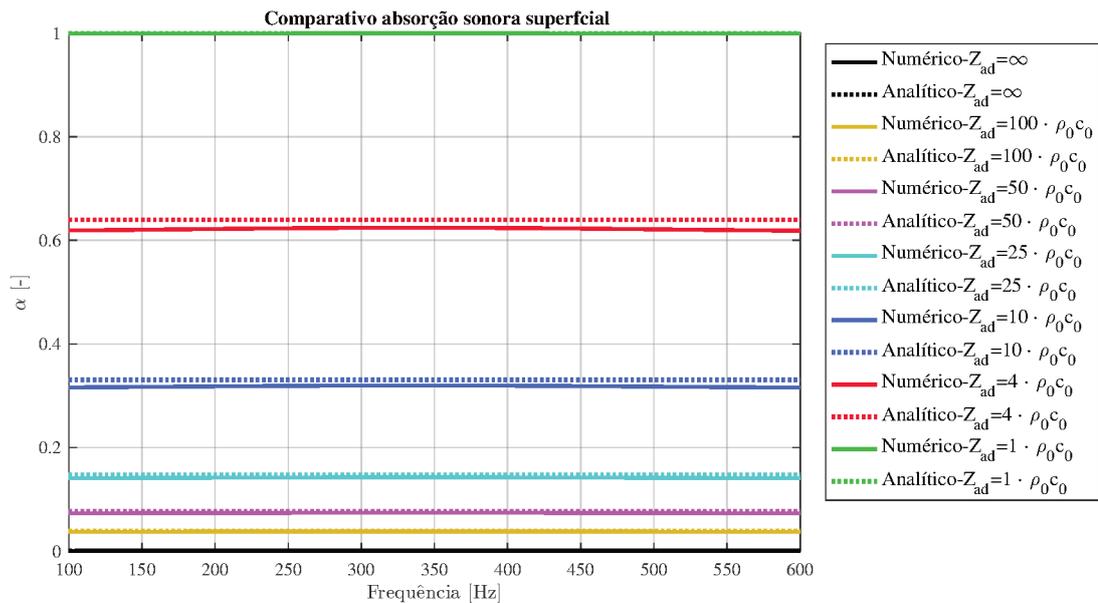


Fonte: O autor.

Os valores analíticos, obtidos com a Equação 2.7, e numéricos gerados a partir de simulação computacional, estão expressos na Figura 39. Foram obtidas curvas para diferentes valores de impedância acústica superficial, partindo de infinito, a qual representa

uma superfície rígida sem absorção, até valores iguais à impedância acústica do meio de propagação, situação onde é esperada a maior absorção. Os valores calculados pelos dois métodos foram consistentes, e com resultados dentro do esperado. O coeficiente de absorção sonora crescendo com a aproximação da impedância acústica da superfície com a impedância do meio.

Figura 39 – Coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância superficial.

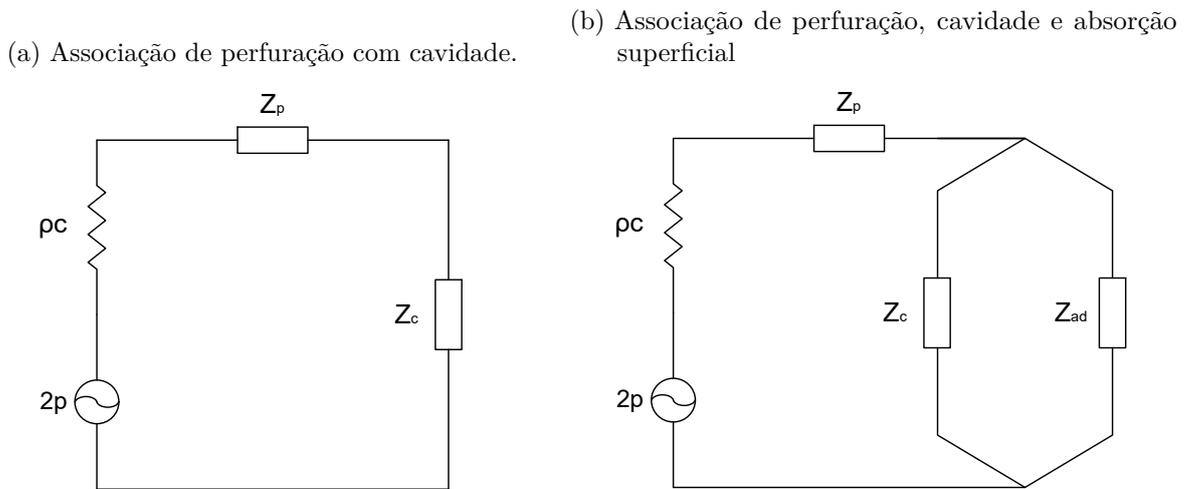


4.2.2 Impedância adicional no interior de um ressonador

A absorção acústica de um ressonador é determinada pela soma da impedância acústica da perfuração e da impedância acústica da cavidade. O caso ideal considera as paredes internas das cavidades são rígidas e que não existe porosidade ou outra forma de dissipação adicional de energia. O circuito acústico equivalente para este caso é demonstrado na Figura 40a. Contudo, para aproximar os modelos teóricos com a situação real da construção da geometria, foi considerado perdas de energia adicionais no interior do ressonador. Para isso, deve considerar que a superfície interna possui alguma absorção, adicionando um valor para a impedância superficial da parede interna diferente do infinito (superfície rígida). O circuito acústico equivalente para este caso é demonstrado na Figura 40b.

O valor da impedância acústica superficial total (Z_t), pode ser determinado ao considerar a associação em paralelo entre a impedância da cavidade com a impedância originada pelas dissipações internas adicionais, e em série com a impedância acústica da perfuração, simplificado analiticamente com a Equação 4.1:

Figura 40 – Circuito acústico equivalente.



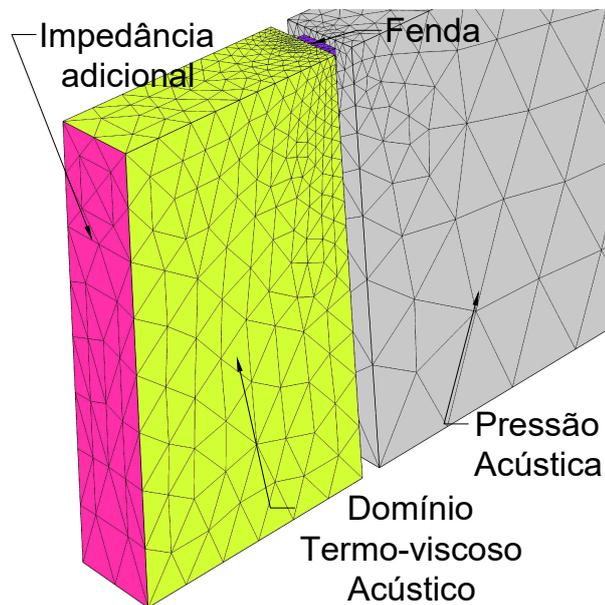
Fonte: O autor.

$$Z_t = Z_p + \frac{Z_c \cdot Z_{ad}}{Z_c + Z_{ad}}, \quad (4.1)$$

onde Z_p representa a impedância acústica da perfuração, Z_c a impedância acústica da cavidade e Z_{ad} a impedância acústica adicional.

Na sequência, foi considerado o efeito da dissipação adicional na simulação numérica. A geometria de estudo possui uma perfuração do tipo fenda, uma cavidade que funciona como ressonador acústico e para uma das superfícies foi variado o valor da impedância (ver Figura 41).

Figura 41 – Malha utilizada para a simulação numérica para obter o coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância adicional amostra n=1, fenda.

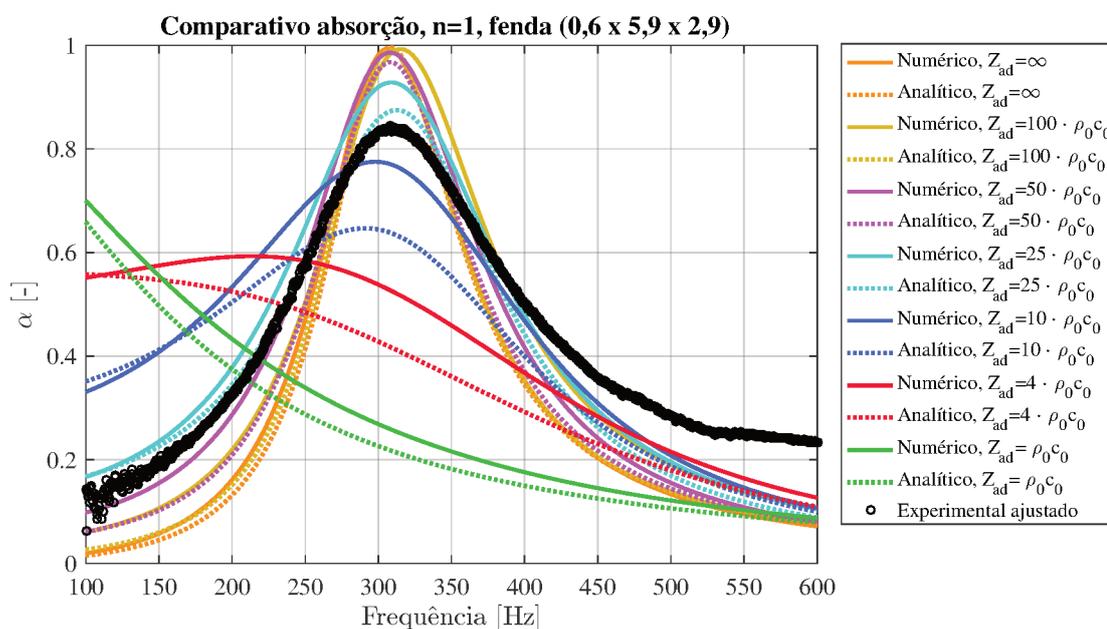


Fonte: O autor.

4.2.3 Geometria n=1 - Fenda (0,6 × 5,9 × 2,9)

A Figura 42 demonstra os resultados do coeficiente de absorção sonora para os modelos analítico e numérico, além do resultado experimental. Todas as curvas são referentes à geometria com cavidade n=1 (sem espaço enrolado) e perfuração do tipo fenda com dimensões: $d_f=0,6$ mm, $L_f=5,9$ mm e $t=2,9$ mm. O maior valor para o coeficiente α da amostra é percebido para a situação onde não existe absorção adicional (curva laranja), ou seja, impedância infinita. Os resultados obtidos pelos modelos analítico e numérico foram próximos e com o aumento da absorção adicional no interior da cavidade, é percebida a redução do pico de α . Contudo, a frequência onde o pico ocorre permanece constante, em cerca de 310 Hz. Para impedâncias muito próximas ao valor da impedância do meio, curvas vermelha e verde, não é possível perceber o pico de α . Por fim, a curva que representa o resultado experimental obteve pico de absorção em cerca de 0,82, ficando próxima ao resultado do valor teórico da curva ciano ($Z_{ad} = 25 \cdot \rho_0 c_0$), cerca de 15% de absorção adicional.

Figura 42 – Coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância adicional amostra n=1, fenda (0,6 x 5,9 x 2,9).



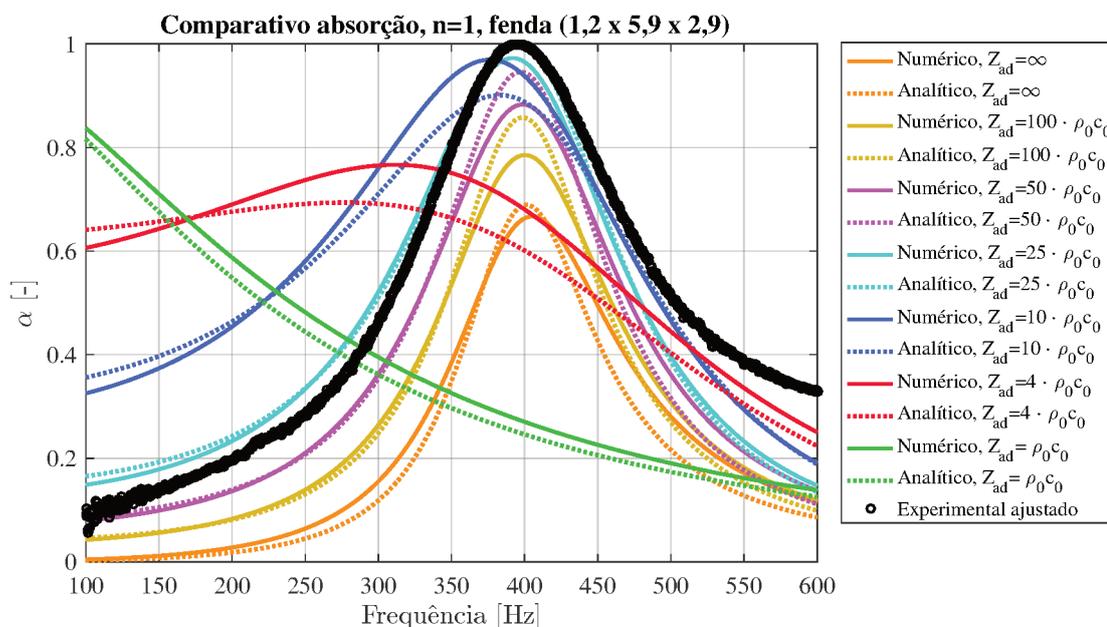
Fonte: O autor.

4.2.4 Geometria n=1 - Fenda (1,2 × 5,9 × 2,9)

Os resultados do coeficiente de absorção sonora para os modelos analítico e numérico, juntamente com a curva obtida em ensaio experimental, são demonstrados na Figura 43. Todos os valores são para a geometria com cavidade n=1 (sem espaço enrolado) e perfuração do tipo fenda com dimensões: $d_f=1,2$ mm, $L_f=5,9$ mm e $t=2,9$ mm. O pico de α foi cerca de 0,75 para o caso de impedância adicional infinita, sem absorção adicional no interior da

cavidade (curva laranja), ocorrido para a frequência de 390 Hz. Com o aumento da absorção interna adicional é possível perceber uma tendência de elevação do pico e alargamento da curva de α , comportamento ocorrido para as curvas amarela ($Z_{ad} = 100 \cdot \rho_0 c_0$), magenta ($Z_{ad} = 50 \cdot \rho_0 c_0$) e ciano ($Z_{ad} = 25 \cdot \rho_0 c_0$). Esta última curva obteve o maior valor de absorção, entre as amostras analisadas. A partir deste ponto, com a elevação da absorção adicional no interior da cavidade (redução do valor da impedância adicional), é percebido a redução geral de α , além do crescimento da absorção para frequências abaixo de 200 Hz. Os resultados foram semelhantes nos modelos analítico e numérico. Por fim, a curva que representa o resultado experimental obteve pico de absorção em cerca de 1,00, permanecendo próxima ao resultado teórico da curva ciano ($Z_{ad} = 25 \cdot \rho_0 c_0$), cerca de 15% de absorção adicional.

Figura 43 – Coeficiente de absorção para a variação do valor da impedância adicional amostra n=1 - fenda (1,2 x 5,9 x 2,9).



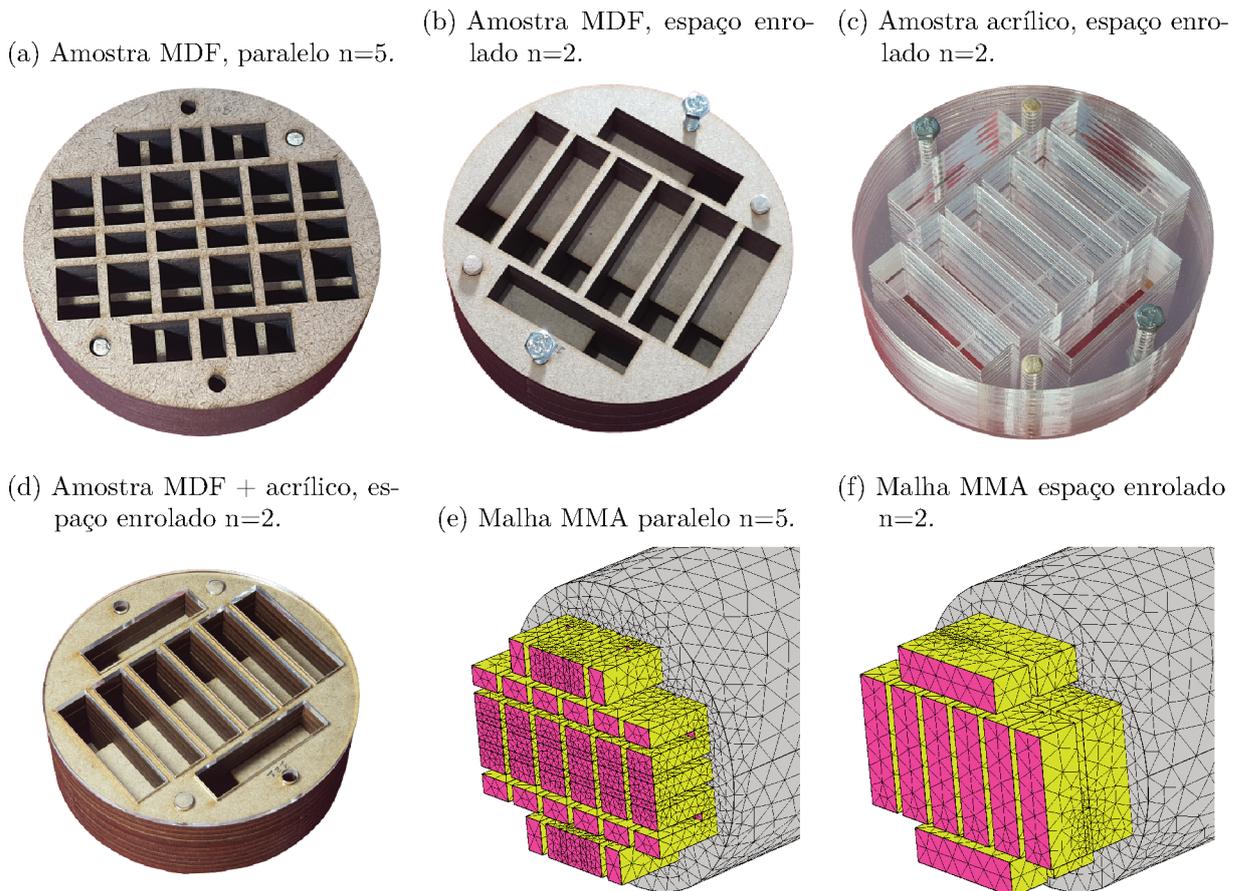
Fonte: O autor.

4.2.5 Investigação da absorção adicional no interior do ressonador

Ensaio utilizando o tubo de impedância foram conduzidos com objetivo de estimar o valor da absorção adicional no interior das cavidades. Para isso, foi aproveitado as amostras dos ressonadores sem o painel frontal, peça onde as perfurações estão localizadas. Dessa forma, apenas os efeitos devido às cavidades foram estudados (ver Figura 44a e Figura 44b). Os modelos teóricos desconsideram os efeitos de dissipações adicionais, dessa forma com os resultados do ensaio será possível identificar as mudanças do comportamento das curvas ao considerar efeitos dissipativos adicionais.

Os resultados numéricos foram obtidos com o COMSOL, sendo gerados com a simulação da geometria completa, sem o painel frontal (ver Figura 44e e Figura 44f). Os resultados das simulações foram produzidos para diferentes valores de absorção adicional, incluindo na simulação ao modificar a impedância acústica da superfície interna da estrutura, com área igual a $S_0 = m \times L$.

Figura 44 – Amostra de metamaterial acústico do tipo espaço enrolado sem tampa.

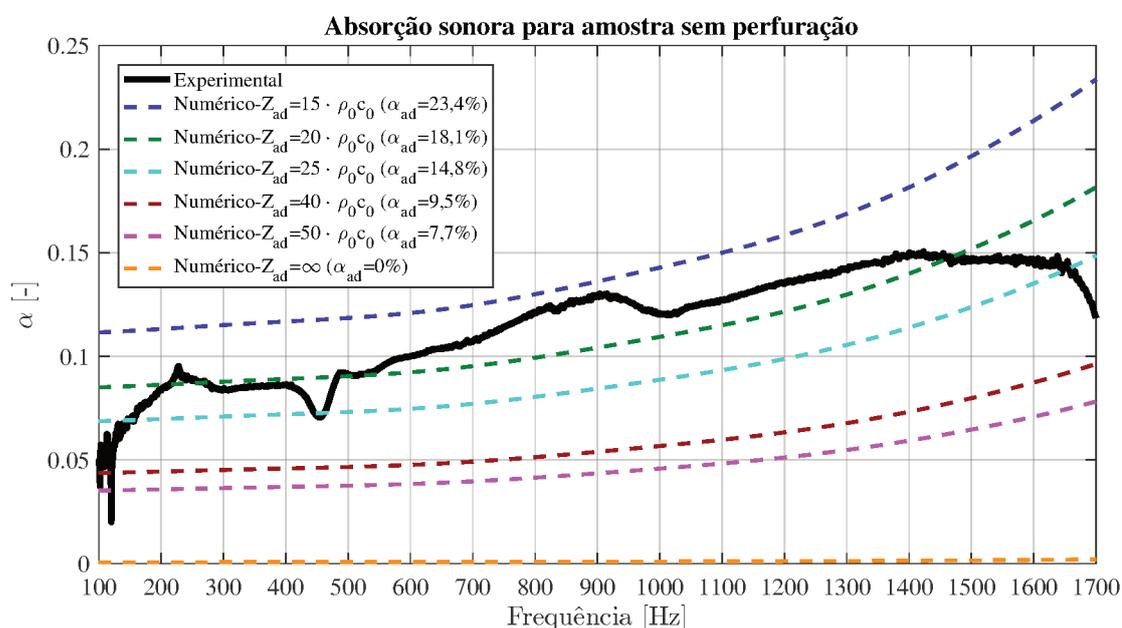


Fonte: O autor.

4.2.5.1 Cavidade espaço enrolado paralelo n=5

A Figura 45 demonstra os resultados para a amostra com cavidade com espaço enrolado paralelo (ver Figura 44a), juntamente com as curvas geradas pelo modelo numérico para várias situações de absorção interna adicional. Ao analisar a curva em preto, é possível identificar que existe o aumento da absorção com elevação da frequência, partindo de 5% até 15%. A curva de resultado numérico laranja ($Z_{ad} = \infty$) ficou distante dos valores obtidos experimentalmente, ela demonstra a situação descrita pela teoria do metamaterial, onde não existe absorção adicional no interior da cavidade. A curva numérica que mais ficou próxima do resultado experimental foi a verde, simulada com valor de absorção adicional de 18,1% ($Z_{ad} = 20 \cdot \rho_0 c_0$).

Figura 45 – Absorção sonora, para diferentes valores de absorção interna adicional, para metamaterial acústico do tipo espaço enrolado paralelo, com $n=5$, sem tampa.



4.2.5.2 Caverna espaço enrolado $n=2$

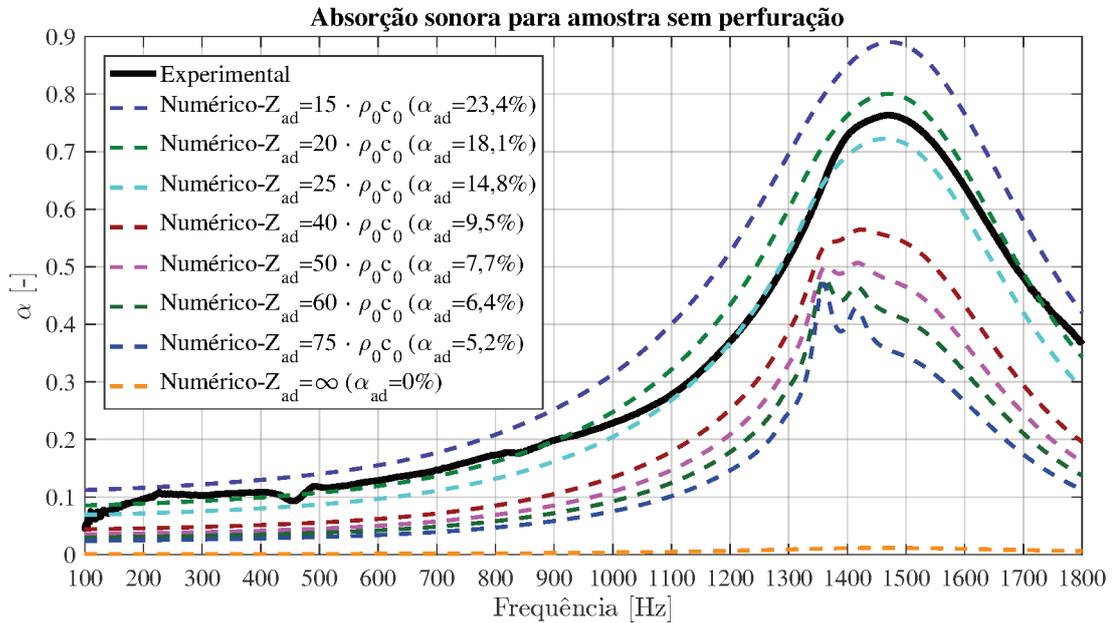
4.2.5.2.1 Construção em MDF

Os resultados para as análises da absorção sonora do metamaterial acústico $n=2$, em MDF e sem tampa (ver Figura 44b), estão expressos na Figura 46. A curva em preto ilustra o resultado experimental obtido pela amostra no ensaio do tubo de impedância. É possível identificar a absorção aumentando com a frequência até um valor máximo, próximo dos 1.500 Hz, para frequências mais altas foi visualizada uma redução da absorção. Este comportamento pode ser justificado pelas características geométricas da estrutura, sem o painel frontal, onde a cavidade inferior atua como um ressonador de Helmholtz. Quando analisadas as curvas dos resultados numéricos, para a situação em que não são contabilizados os efeitos dissipativos adicionais no interior da cavidade, curva laranja ($Z_{ad} = \infty$), o comportamento foi distinto ao observado nos resultados experimentais. Com isso fica visível que apenas o fenômeno de ressonância não é capaz de explicar o comportamento percebido pelo resultado experimental. A curva de resultado numérico em ciano ($Z_{ad} = 25 \cdot \rho_0 c_0$) representa o emprego de absorção adicional de 14,8% no interior da estrutura, sendo o resultado que mais aproximou-se ao valor experimental (curva preta).

4.2.5.2.2 Amostras com cola adicional entre as camadas

Para avaliar tanto a influência do uso de diferentes materiais construtivos como também o efeito da utilização de mais fluido adesivo entre as camadas no desempenho

Figura 46 – Absorção sonora, para diferentes valores de absorção interna adicional, para metamaterial acústico do tipo espaço enrolado $n=2$, sem tampa.

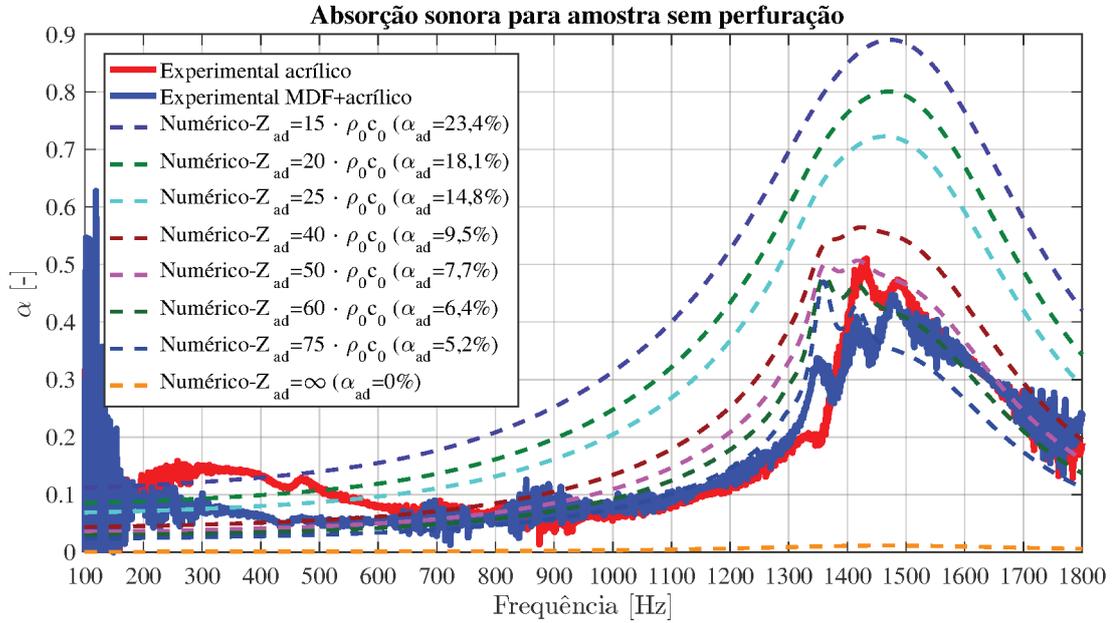


final do metamaterial, foram construídas duas amostras com dimensões idênticas. Além disso, o processo de corte e montagem ocorreram no mesmo dia, com objetivo de limitar efeitos ambientais na característica dos objetos. Na primeira amostra de metamaterial do tipo espaço enrolado, $n=2$, foi utilizado acrílico como matéria-prima (ver Figura 44c). Para a segunda, foi utilizado MDF (ver Figura 44d), com exceção da última camada que foi substituída pelo acrílico. O processo de construção foi o mesmo para ambas amostras e uma quantidade maior de fluido adesivo foi utilizado entre as camadas, quando comparada com as amostras anteriores (ver Figura 44a e Figura 44b). Após montadas as amostras, todo o excesso de cola foi retirado com um pincel. O objetivo desta mudança na técnica de construção é evitar ao máximo a existência de microcanais que liguem o interior das cavidades, e que resultam em vazamento acústico.

Os resultados expressos na Figura 47 demonstram proximidade entre as curvas para as duas amostras analisadas. A curva experimental azul, referente a amostra construída em MDF com última camada em acrílico, obteve pico de absorção ligeiramente inferior, indicando com isso que possui absorção interna adicional menor. Quando comparada com os resultados numéricos, esta curva experimental ficou próxima aos valores com absorção interna adicional com cerca de 6,4% ($Z_{ad} = 60 \cdot \rho_0 c_0$). A curva experimental vermelha, relativa à amostra em acrílico, ficou próxima com o resultado do modelo numérico para absorção adicional de 7,7% ($Z_{ad} = 50 \cdot \rho_0 c_0$). O menor pico de absorção obtido pelas amostras, quando comparado com as amostras experimentais anteriores, indicam que o rigor na construção dos metamateriais com relação ao vazamento acústico, resulta diretamente no desempenho da amostra. Entre os materiais utilizados como matéria-prima

não foi identificado, pelo menos nestes ensaios, diferenças significativas devido a esta variável.

Figura 47 – Absorção sonora, para diferentes valores de absorção interna adicional, para metamaterial acústico do tipo espaço enrolado $n=2$, sem tampa.



Fonte: O autor.

4.3 Fator de correção em razão da área útil da amostra

Os ensaios para determinar a absorção sonora são realizados utilizando um tubo de impedância com seção transversal circular. Deste modo, não é possível aproveitar toda a área disponível da amostra com cavidades retangulares. Os resultados experimentais de absorção devem ser corrigidos para considerar apenas o percentual de área útil utilizado pelo metamaterial estudado, assim pode-se comparar estes valores com os modelos teóricos e de simulação.

4.3.1 Área de aproveitamento da amostra

Para determinação do Fator de Aproveitamento (F_{ap}) da amostra foi considerada a relação entre a área de secção frontal ocupada pelas cavidades dos metamateriais e a área total da amostra. Seguindo o modelo de Wang *et al.* (2018a), a área frontal do metamaterial é composto por $A = (m + b_0) \cdot (L + b_0)$ (ver Figura 48a). O valor do fator de aproveitamento para a amostra de metamaterial circular pode ser determinado com as equações a seguir:

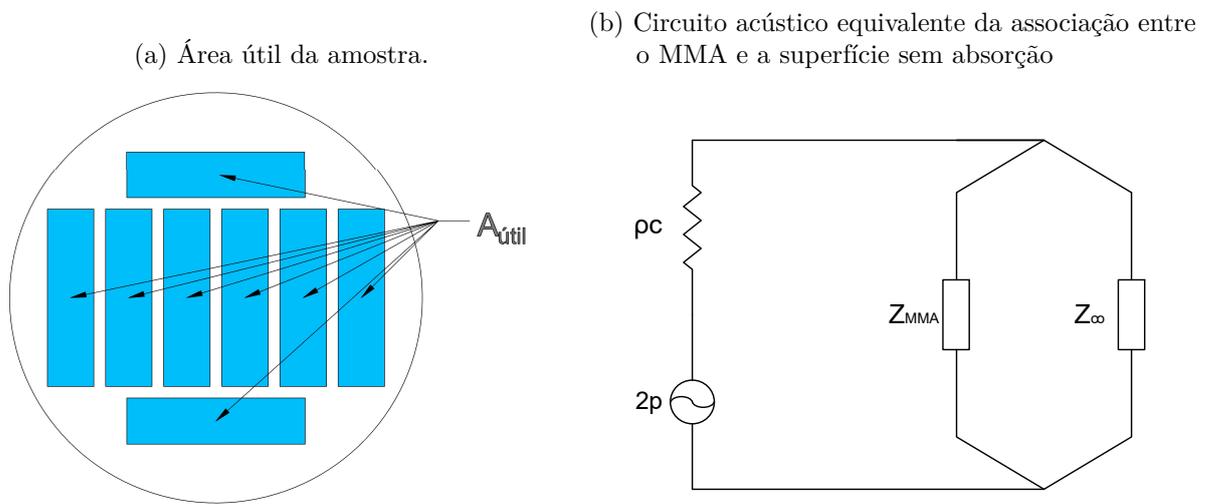
$$A_{total} = \frac{\pi 107^2}{4} = 8992,0 \text{ mm}^2, \quad (4.2)$$

$$A_{util} = 15 \cdot 49 \cdot 8 = 5880,0 \text{ mm}^2, \quad (4.3)$$

$$F_{ap} = \frac{A_{util}}{A_{total}} = 0,6539, \quad (4.4)$$

sendo A_{total} a área de seção frontal da amostra estudada, A_{util} as áreas das cavidades da amostra e F_{ap} o fator de aproveitamento da amostra.

Figura 48 – Determinação do fator de correção devido ao aproveitamento da amostra fabricada.



Fonte: O autor.

4.3.2 Fator de aproveitamento da amostra

O valor para a correção dos resultados experimentais, devido à área de aproveitamento da amostra, pode ser determinado utilizando a analogia do circuito acústico equivalente, como demonstrado na Figura 48b. No sistema estudado, existe a associação em paralelo entre as áreas dos metamateriais estudados (área útil), com a área de material utilizado para o preenchimento da amostra. A impedância acústica resultante da amostra pode ser determinada pela Equação 4.5:

$$\frac{1}{Z_{resultante}} = \frac{F_{ap}}{Z_{mma}} + \frac{1 - F_{ap}}{Z_{\infty}}, \quad (4.5)$$

sendo Z_{∞} a impedância acústica da região que não faz parte do metamaterial, Z_{mma} a impedância acústica superficial do metamaterial e $Z_{resultante}$ a impedância acústica resultante. Considerando que a superfície que não faz parte do metamaterial não possui absorção, ou seja, Z_{∞} suficientemente elevado, a Equação 4.5, capaz de aplicar a correção nos resultados experimentais da amostra fabricada, pode ser simplificada por:

$$Z_{resultante} = \frac{Z_{mma}}{F_{ap}}. \quad (4.6)$$

4.3.3 Efeito da área de aproveitamento

Com intuito de determinar de forma experimental qual a influência do fator de aproveitamento das amostras de metamaterial acústico, um novo conjunto de experimentos foi planejado. A maneira ideal de verificar o modelo de correção, descrito pela Equação 4.6, seria criar uma amostra com fator de aproveitamento próximo a 100%, ou seja, composta quase que totalmente por cavidades de metamateriais. Entretanto, como atualmente existe à disposição apenas o aparato de tubo de impedância com seção transversal circular, não é possível formar uma amostra com cavidades retangulares e aproveitamento unitário.

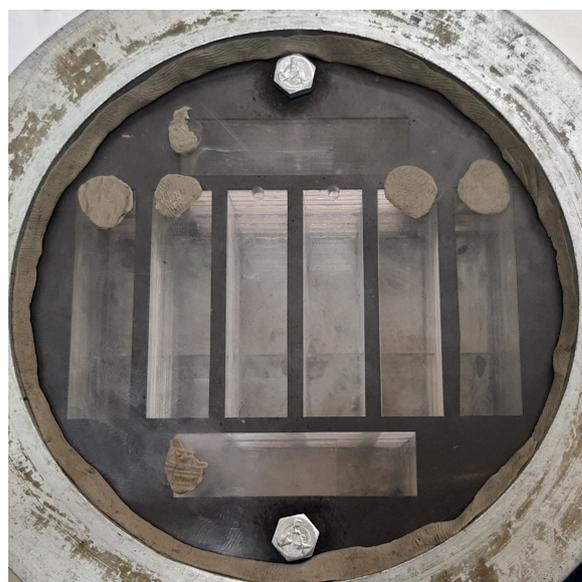
Diante disso, o ensaio proposto seguiu o raciocínio inverso, as amostras iniciaram com maior fator de aproveitamento possível. Prosseguiu com a redução deste fator, ao bloquear as cavidades com massa de calafetar (Figura 49). Deste modo foi possível variar o fator de aproveitamento da amostra de metamaterial, com mesmas dimensões, e analisar os efeitos que o fator de aproveitamento têm no resultado. Além disso, foi possível investigar se a Equação 4.6, proposta para corrigir os resultados devido ao aproveitamento da amostra, funciona em todas as condições.

Figura 49 – Montagem experimental das amostras.

(a) Duas cavidades cobertas.



(b) Seis cavidades cobertas.

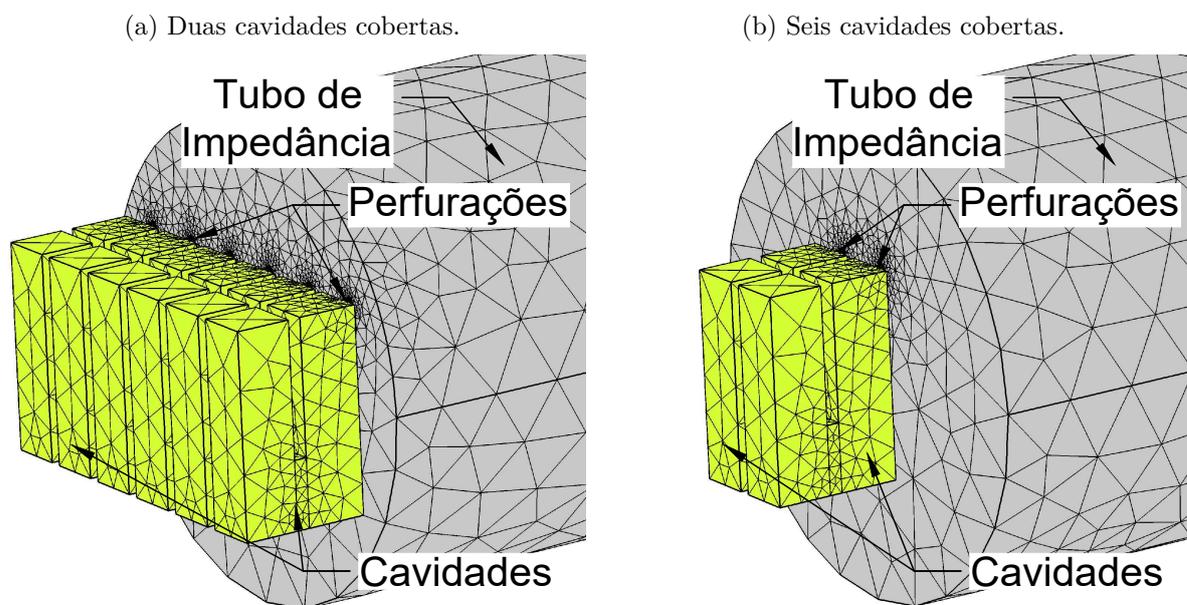


Fonte: O autor.

Os resultados para o modelo numérico foram obtidos ao simular a geometria completa, com as mesmas dimensões da amostra utilizada para o ensaio com tubo de impedância. Os resultados da simulação não foram corrigidos, as mudanças de cada situação foi obtida ao excluir as cavidades de metamateriais da simulação. O ensaio

completo é obtido ao considerar oito cavidades de metamaterial, os ensaios seguiram ao sucessivamente reduzir os números de cavidades. As geometrias utilizadas para o modelo numérico estão demonstradas pela Figura 50a e Figura 50b, para duas e seis cavidades cobertas de metamaterial, respectivamente.

Figura 50 – Malha utilizada para a simulação numérica para obter o coeficiente de absorção sonora para diferentes números de cavidades.



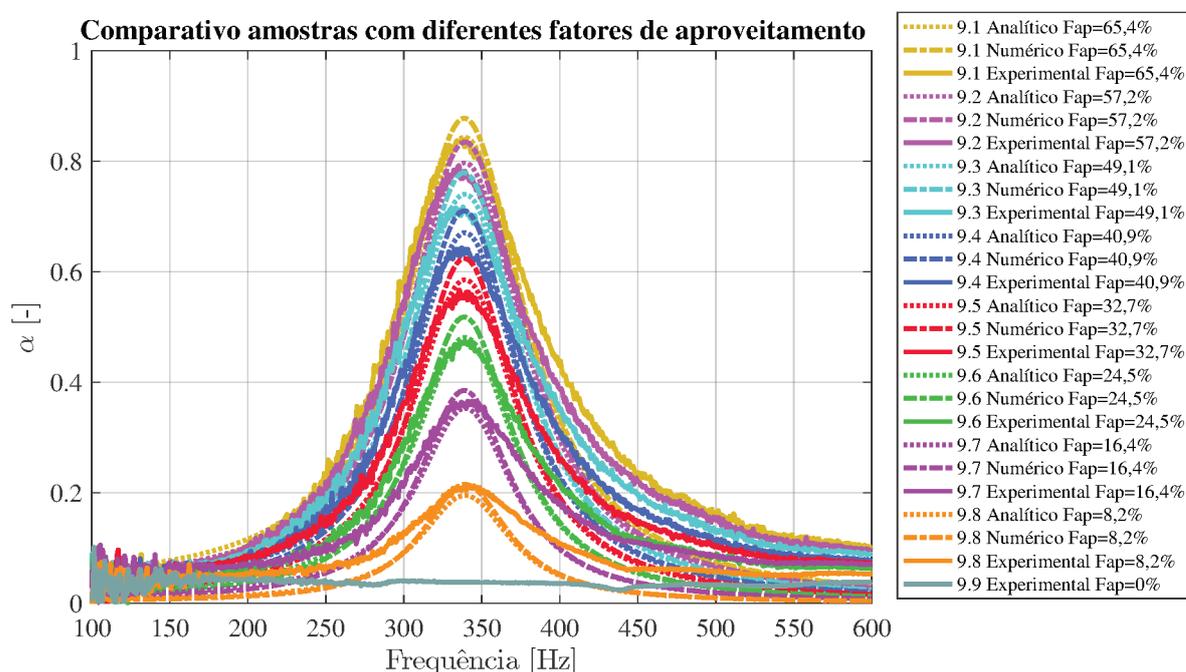
Fonte: O autor.

Os modelos analíticos disponíveis na bibliografia consideram que o fator de aproveitamento da amostra é unitário. Assim, para considerar a variação do aproveitamento devido a diferentes cavidades existentes no ensaio, foi aplicada a Equação 4.6. Os resultados estão demonstrados na Figura 51. Também é possível visualizar as curvas obtidas pelo modelo numérico, plotadas sem qualquer correção dos resultados. Por fim, as curvas originadas pelos ensaios experimentais foram plotadas, para este conjunto de resultados foi investigada uma última situação, condição com todas as cavidades cobertas (Exp. 9.9). Como esperado, quando não existe cavidade de metamaterial operando também não é possível observar um pico de absorção, o valor resultante da absorção sonora foi aproximadamente constante sendo originado por efeitos dissipativos dos elementos construtivos dos materiais.

A comparação geral dos resultados expressos pela Figura 51 indicam que, apesar dos dados serem obtidos por maneiras distintas, o comportamento foi muito próximo. Isto posto, os resultados destas investigações reforçam a hipótese da utilização do fator de correção para o ajuste de resultados, em situações que não é possível construir amostras com fator de aproveitamento unitário.

Os resultados experimentais foram sintetizados e estão expressos na Tabela 3. O

Figura 51 – Comparação do coeficiente de absorção para diferentes fatores de aproveitamento da amostra n=2 - Circular (d=2,13 mm).



Fonte: O autor.

fator de aproveitamento foi determinado para cada amostra, utilizando a Equação 4.4. Como esperado, é possível verificar que com a redução do número de cavidades de metamaterial participando do ensaio, a amplitude do coeficiente de absorção sonora (α) e a largura de absorção em 50%, também reduziram. Outro fato a ser destacado é a coluna com a frequência em que ocorre o pico de absorção, houve pouca variação entre os ensaios, com valores entre 336 Hz e 342 Hz, indicando que este parâmetro não é dependente do fator de aproveitamento das amostras.

Tabela 3 – Aplicação do fator de correção para diferentes fatores de aproveitamento da amostra n=2 - Circular (d=2,13 mm).

Amostra	Número de cavidades	Fator de aproveitamento	Freq. Pico [Hz]	α	Largura 50% [Hz]
Exp. 9.1	8	65,4%	340	0,84	95
Exp. 9.2	7	57,2%	336	0,79	88
Exp. 9.3	6	49,1%	338	0,72	75
Exp. 9.4	5	40,9%	337	0,64	59
Exp. 9.5	4	32,7%	339	0,56	36
Exp. 9.6	3	24,5%	339	0,47	0
Exp. 9.7	2	16,4%	341	0,37	0
Exp. 9.8	1	8,2%	342	0,21	0
Exp. 9.9	0	0%	-	-	0

Fonte: O autor.

Ao analisar os resultados experimentais apresentados na Figura 51, especificamente a curva 9.9 correspondente à amostra com todas as perfurações obstruídas, fica evidente que a absorção sonora não foi nula, apresentando valores de aproximadamente 4%. Esta

característica, que também se manifestou nos estudos preliminares dos materiais como explicitado pela Figura 37, adiciona uma certa complexidade ao processo de aplicação do fator de aproveitamento. Como essa absorção é constante em todas as amostras e se origina de outros mecanismos de dissipação, como a natureza porosa do material constituinte da amostra, a aplicação direta do fator de aproveitamento ao resultado bruto poderia resultar em uma amplificação artificial desta parcela de absorção constante para as amostras com fatores de aproveitamento menores. Este efeito fica evidenciado por um aumento artificial na curva de absorção, como ilustrado na Figura 95, disponível no Apêndice D. Para contornar este problema, foi introduzido uma etapa adicional no processamento, que consiste em remover a absorção resultante dos efeitos porosos antes da aplicação do fator de correção, conforme será detalhado a seguir.

4.3.4 Proposta de implementação do fator de aproveitamento

A curva experimental no qual o fator de correção deve ser implementado representa a relação entre a impedância acústica da amostra e a impedância acústica do ar, conforme ilustrado na Figura 52a. Posteriormente, utilizando a Equação 4.7, foram determinados tanto o coeficiente de reflexão sonora para a amostra quanto para a parcela de absorção adicional, esta última obtida a partir dos resultados experimentais da amostra 9.9, onde todas as perfurações das cavidades estavam obstruídas. O coeficiente de reflexão é representado na curva da Figura 52b. O passo subsequente envolve a remoção da parcela de absorção porosa da curva experimental, resultando na curva em azul exibida na Figura 52c. Após a remoção da parcela de absorção porosa, a impedância acústica pode ser reconstruída aplicando a Equação 4.8, como demonstrado na Figura 52d. Com isso, a Equação 4.6 pode finalmente ser utilizada para determinar a curva experimental corrigida.

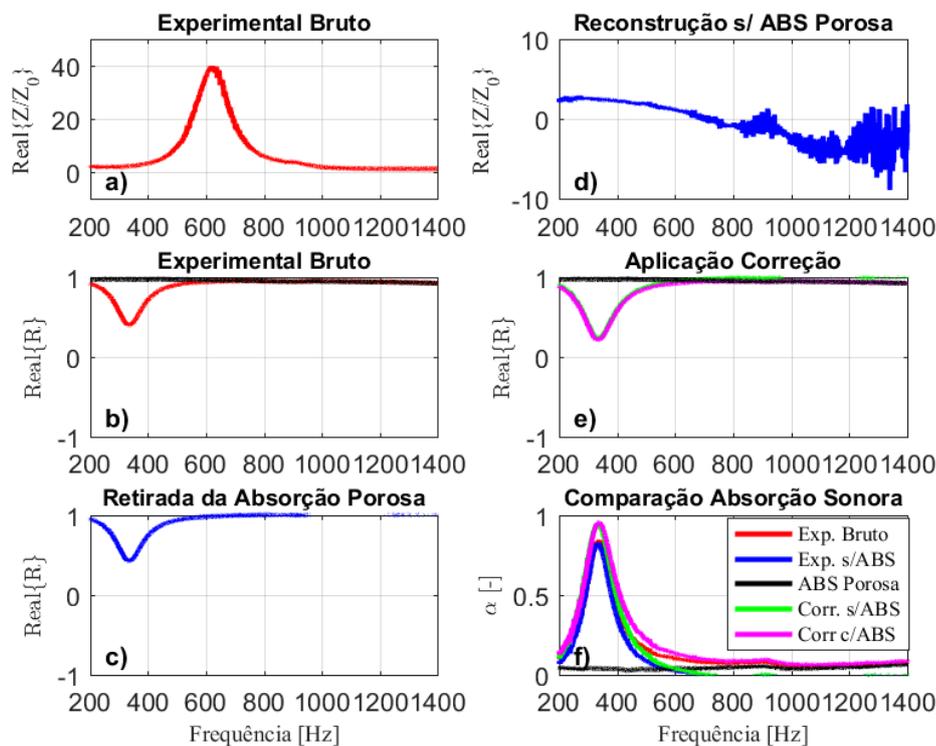
$$\tilde{R} = \left(\frac{\tilde{Z}/Z_0 - 1}{\tilde{Z}/Z_0 + 1} \right). \quad (4.7)$$

$$\tilde{Z} = Z_0 \left(\frac{-\tilde{R} - 1}{\tilde{R} - 1} \right). \quad (4.8)$$

Em seguida, o coeficiente de reflexão é novamente determinado, conforme ilustrado na Figura 52e. A parcela de absorção porosa, que havia sido retirada da curva experimental para aplicação da correção, pode ser reincorporada ao resultado da amostra. A Figura 52f, por fim, compara as curvas de absorção em diferentes etapas do processo de aplicação do fator de aproveitamento, com destaque para as curvas magenta e vermelha. Essas representam, respectivamente, o resultado corrigido da absorção e a curva experimental bruta sem modificações. A implementação do fator de correção não alterou a frequência na qual ocorre o pico de absorção, e também não houve modificação significativa na absorção fora do pico. Isso ocorre justamente porque o fenômeno responsável por essa

parcela de dissipação está relacionado à característica porosa da amostra, aspecto que não é modificado durante a aplicação do modelo proposta para fator de correção.

Figura 52 – Aplicação do fator de correção para diferentes fatores de aproveitamento da amostra $n=2$ - Circular ($d=2,13$ mm).



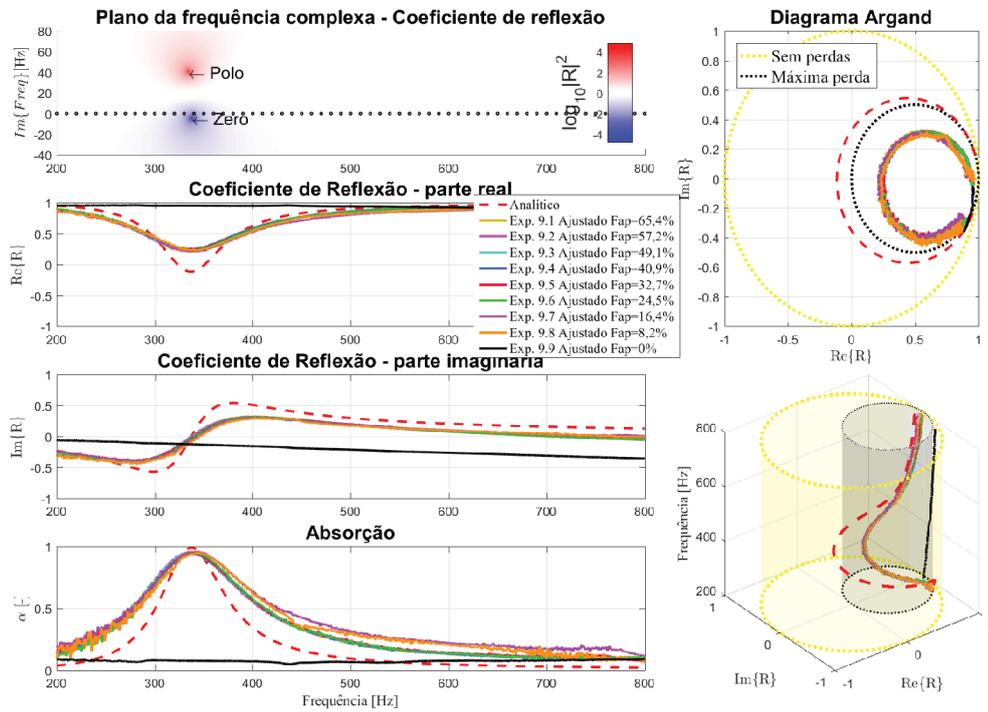
Fonte: O autor.

A implementação do fator de aproveitamento em todas as amostras, com diversas áreas efetivas de ressonadores, resultou em valores consistentes, sugerindo que o algoritmo de correção atingiu seu propósito. Isto é, a partir da relação entre a área total da amostra e a soma das áreas dos ressonadores, o algoritmo ajustou o valor do resultado para representar a eficiência unitária. Dessa forma, tornou-se possível a comparação direta com os modelos analíticos e numéricos. A correção não alterou a frequência do pico de absorção e se mostrou eficaz para toda a faixa analisada. Foi notada uma maior variabilidade nas curvas com menor eficiência, representadas pelos experimentos 9.7 e 9.8, que apresentaram aproveitamentos de 16,4% e 8,2%, respectivamente. Isso pode ser justificado pela necessidade de um aumento mais significativo das curvas experimentais durante o processo de correção, resultando em uma maior variabilidade devido aos ruídos aleatórios do sinal experimental.

4.3.5 Validação do fator de aproveitamento

A fim de verificar a validade da aplicação do fator de correção nas amostras estudadas, foi verificado sua utilização nos resultados analíticos, numéricos e experimentais

Figura 53 – Aplicação do fator de correção para diferentes fatores de aproveitamento da amostra $n=2$ - Circular ($d=2,13$ mm).



Fonte: O autor.

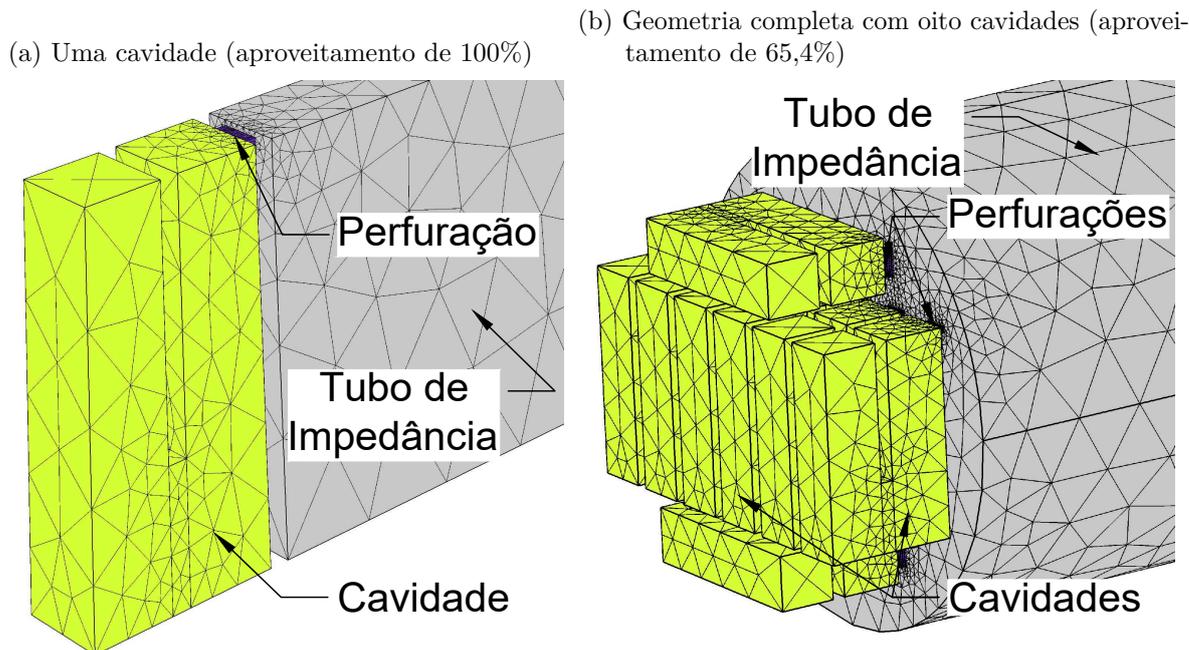
para duas amostras de metamaterial de espaço enrolado, $n=2$ com diferentes perfurações. As equações pertencentes aos modelos analíticos consideram que existe o aproveitamento máximo da amostra, então o fator de correção (Equação 4.6) foi aplicado no resultado para representar a amostra com menor fator de aproveitamento, ou seja, para representar o comportamento da amostra construída.

A geometria da simulação computacional é construída conforme a necessidade de estudo. Deste modo, foram desenvolvidos dois conjuntos de simulações, a primeira com aproveitamento máximo (ver Figura 54a). Por outro lado, para a segunda foi construída a geometria com todas as cavidades da amostra (ver Figura 54b), assim como a estrutura utilizada nos ensaios experimentais. Com isto não foi aplicada nenhuma correção nos resultados dos modelos numéricos. A simulação completa, com as oito cavidades posicionadas em uma área com seção transversal circular, resulta no comportamento mais próximo da situação experimental. A simulação considerou uma absorção interna adicional de 14,8% ($Z_{ad} = 25 \cdot \rho_0 c_0$).

Os resultados experimentais, gerados a partir de ensaio com aparato de tubo de impedância, são demonstrados de duas maneiras:

1. Sem correção;
2. Aplicando a Equação 4.6 nos valores de impedância medidos, na sequência calcula-se

Figura 54 – Malha de elementos finitos construída para simulação.



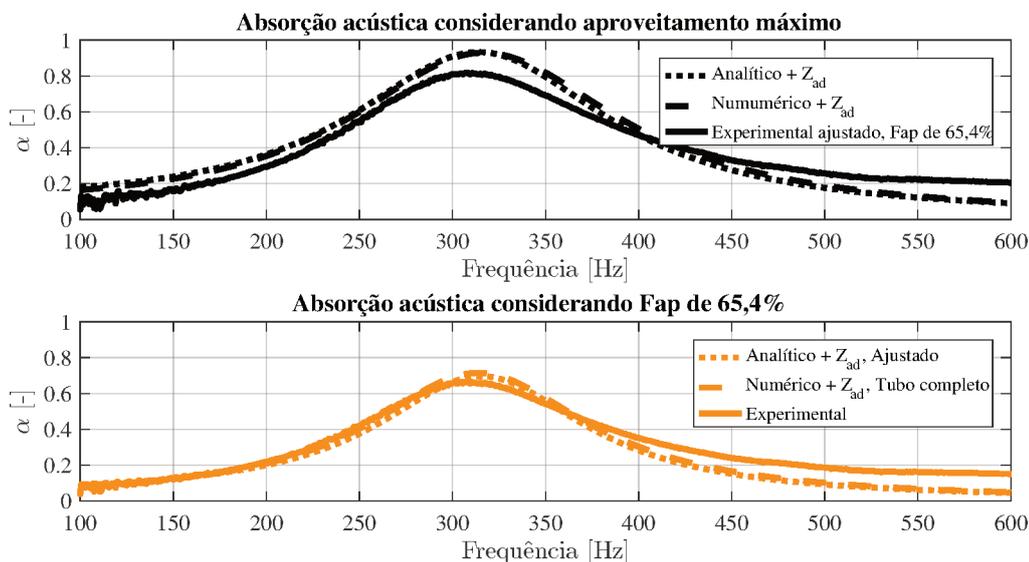
Fonte: O autor.

o coeficiente de absorção da amostra.

As curvas para o metamaterial com $n=1$ e perfuração do tipo fenda ($0,6 \times 5,9 \times 2,9$) são apresentadas na Figura 55. A amostra exibiu uma absorção máxima de 67% no resultado experimental sem ajuste e de 91% no resultado experimental ajustado, ambos ocorrendo na frequência de 316 Hz. As curvas superiores representam a comparação entre os três modelos (analítico, numérico e experimental), considerando um aproveitamento máximo da amostra, ou seja, somente o resultado experimental precisou ser ajustado. As curvas inferiores ilustram a situação onde o aproveitamento é de 65,4%, e nesse caso, não houve necessidade de alterações nos valores experimentais. O ajuste foi aplicado ao resultado do modelo analítico e os valores do modelo numérico já consideram esta condição ao considerar a geometria completa.

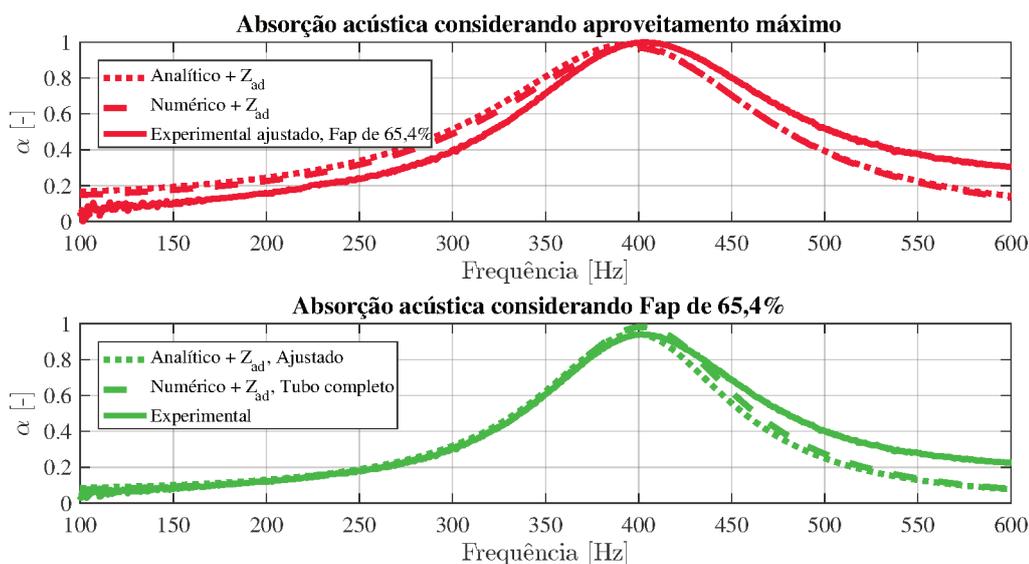
Os resultados para o metamaterial com $n=1$ e perfuração do tipo fenda ($1,2 \times 5,9 \times 2,9$) são apresentados na Figura 56. A amostra alcançou uma absorção máxima de 94% e 99% para as curvas experimentais sem ajuste e com correção, respectivamente, devido ao fator de aproveitamento. Ambos os resultados apresentaram picos de absorção na frequência de 403 Hz. Portanto, o fator de correção referente ao aproveitamento da amostra provou ser eficaz na correção das limitações impostas pela geometria empregada nos ensaios. Foi possível aplicar este fator tanto nos valores experimentais quanto nos teóricos, resultando em uma correspondência precisa entre as curvas.

Figura 55 – Comparação do coeficiente de absorção para dois valores de fator de aproveitamento da amostra $n=1$, fenda (0,6 x 5,9 x 2,9).



Fonte: O autor.

Figura 56 – Comparação do coeficiente de absorção para dois valores de fator de aproveitamento da amostra $n=1$, fenda (1,2 x 5,9 x 2,9).



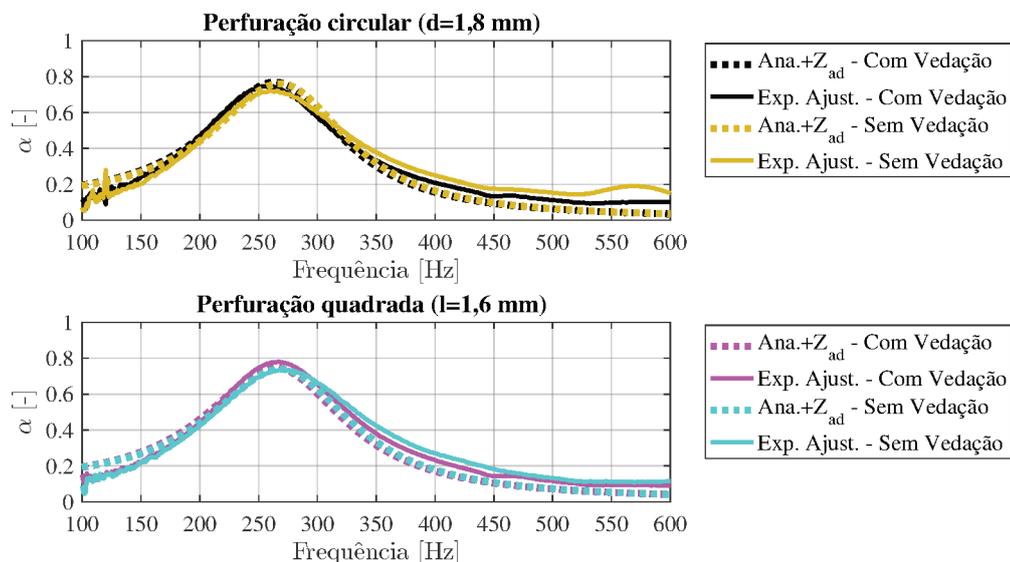
Fonte: O autor.

4.4 Avaliação da efetividade do anel de vedação no desempenho das amostras

Foi planejado um conjunto de ensaios para verificar a efetividade da utilização do anel de vedação construído em borracha, com 1 mm de espessura. A função planejada para esta peça seria reduzir a ocorrência de vazamento acústico entre as cavidades e o painel microperfurado. Os ensaios visaram analisar a diferença do comportamento da amostra desempenhada devido ao uso do anel de vedação.

O primeiro conjunto de ensaios avaliaram a influência do anel de vedação para amostras com cavidades e painel microperfurado manufacturados em MDF, com perfurações circulares e quadradas (ver Figura 57). Foi plotado também as curvas para o modelo analítico com absorção interna adicional de 14,8% ($Z_{ad} = 25 \cdot \rho_0 c_0$). O comportamento das curvas demonstra que existe proximidade entre os resultados, indicando que a utilização do anel de vedação causa pouca influência no desempenho final da amostra. Entretanto, houve uma breve elevação da absorção, cerca de 2% para a amostra com perfuração circular e 4% para amostra quadrada. Além disso, as curvas deslocaram-se cerca de 7 Hz para as baixas frequências, fato justificado pelo aumento que a dimensão do anel de vedação causa no parâmetro w da amostra, alterando a dimensão geométrica do metamaterial.

Figura 57 – Verificação do anel de vedação para perfuração circular e quadrada e cavidade de espaço enrolado $n=2$ em MDF.

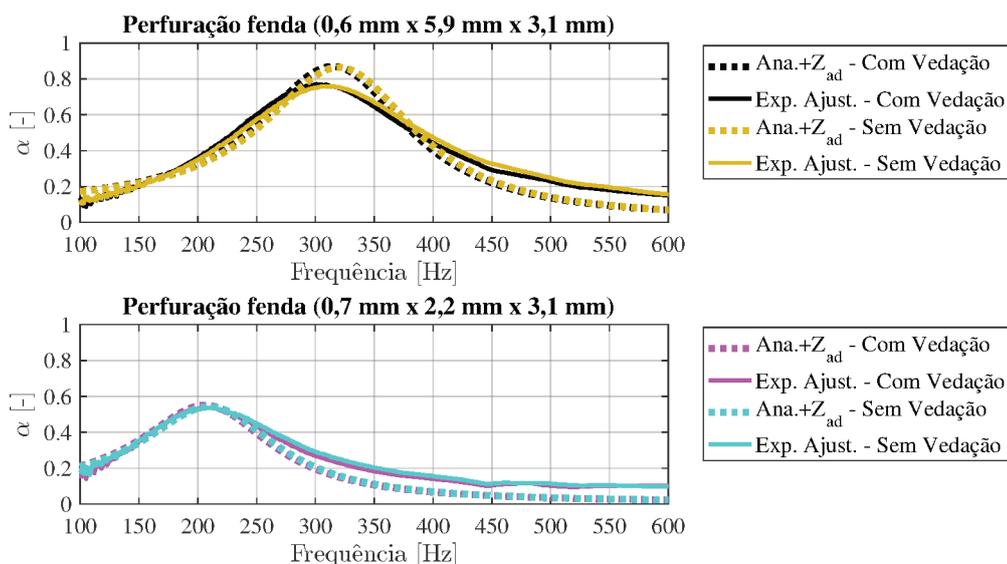


Fonte: O autor.

Os efeitos do anel de vedação também foram investigados para amostras com perfuração fenda. Os resultados para a absorção sonora estão expressos pela Figura 58. A amostra com fenda de dimensões (0,6 x 5,9 x 3,1), obteve o pico muito próximo para as duas curvas de resultados experimentais, entretanto a curva preta, representando a

amostra com anel de vedação, resultou em uma largura de banda de absorção superior que a curva para a situação sem anel de vedação (curva amarela). Os ensaios para as amostras com dimensões de (0,7 x 2,2 x 3,1), resultaram em pouca diferença de absorção devido ao anel de vedação.

Figura 58 – Verificação do anel de vedação para perfuração fenda e cavidade de espaço enrolado $n=2$ em MDF.



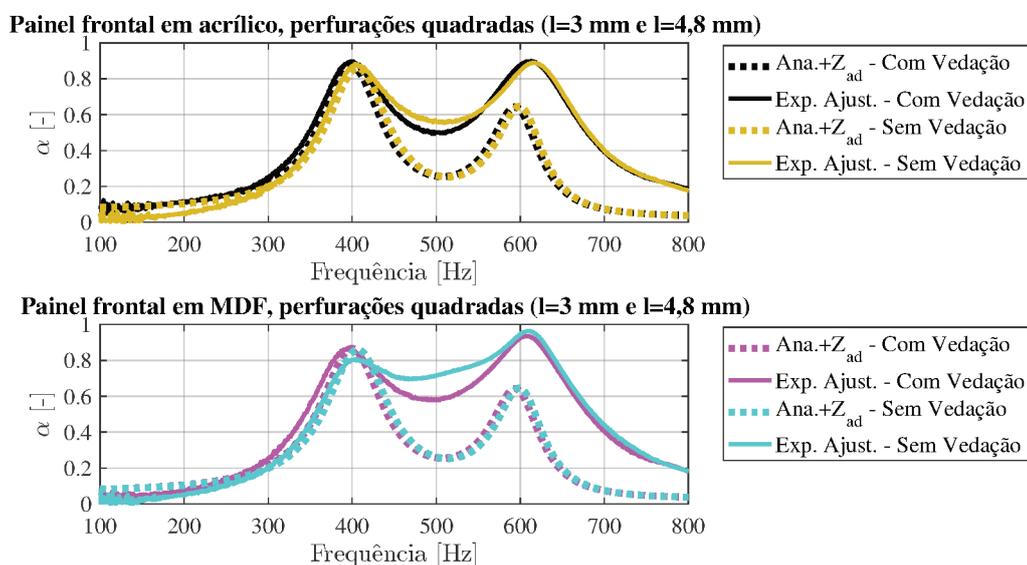
Fonte: O autor.

Por fim, foi avaliada também a diferença do comportamento das curvas para a situação onde a amostra possui simultaneamente dois tipos de perfurações, projetadas para as frequências de 400 Hz e 600 Hz (ver Figura 59). As curvas dos modelos analíticos consideram absorção interna adicional de 7,7% ($Z_{ad} = 50 \cdot \rho_0 c_0$). Os resultados demonstraram um leve deslocamento dos picos de absorção, cerca de 8 Hz para as baixas frequências. As amostras com simultaneamente dois picos de absorção apresentaram um novo comportamento quanto ao uso do anel de vedação. Quando utilizada a peça em borracha (curvas preta e magenta), o desempenho tendeu a aproximar aos respectivos modelos teóricos. Entretanto, a situação onde não foi utilizado a vedação, foi percebido uma dissipação adicional. A faixa entre os dois picos de absorção apresentaram valores mínimos da absorção (ocorridos para a frequência de 500 Hz) superiores. A curva em ciano ilustra de maneira mais clara o efeito de absorção adicional na região entre os dois picos de absorção.

4.5 Síntese do capítulo

O presente capítulo tratou sobre o entendimento da influência das propriedades dos materiais e montagem das amostras no comportamento final do metamaterial acústico, além de apresentar uma metodologia para corrigir as limitações da amostra experimental,

Figura 59 – Verificação da influência do anel de vedação para amostra com simultaneamente duas dimensões de perfurações quadradas e cavidade de espaço enrolado, $n=2$, em acrílico.



Fonte: O autor.

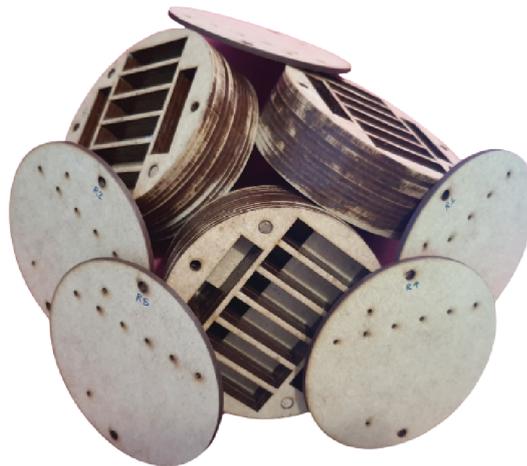
construída com fator de aproveitamento inferior a 100%. Inicialmente foi avaliada a absorção sonora das matérias-primas, para com isso determinar se contribuem de forma significativa no desempenho final. Os resultados indicaram baixa absorção sonora, na faixa até 800 Hz, o valor de α demonstrou ser independente da frequência, permanecendo quase constante. Para valores além desta frequência, foi percebido um aumento da absorção com incremento da frequência. Na sequência buscou-se avaliar se o interior das cavidades das amostras contribuem de forma significativa com a absorção do material, avaliar também sobre de que maneira o adicional de absorção deve ser tratado nos modelos analíticos e numéricos. Foi identificado, ao avaliar diversos resultados experimentais, que o processo de montagem das amostras influencia diretamente a dissipação adicional no interior das cavidades. Para que os modelos teóricos e as simulações correspondam com os valores experimentais, foi proposta e avaliada uma maneira de considerar estes fenômenos adicionais, com elevada correspondência dos resultados. Outro ponto avaliado foi o fator de correção devido ao aproveitamento da amostra, como o modelo de metamaterial estudado possui cavidades retangulares e as amostras são construídas com seção circular, não é possível projetar metamateriais com aproveitamento unitário. Com isso, para que os modelos teóricos sejam capazes de prever com maior assertividade o comportamento experimental, foi proposto e avaliado um modelo de correção. Os resultados indicam alta correspondência das curvas dos modelos analítico, numérico e experimental, quando utilizado o fator de correção. Por fim, foi estudada a efetividade da utilização do anel de vedação, para evitar a ocorrência de vazamento acústico no metamaterial. Os resultados indicam que existe pouca influência da utilização deste elemento.

5 Aplicando o Controle Estatístico de Processo

5.1 Amostra para o estudo estatístico

A avaliação estatística das amostras foi planejada com metamaterial acústico em MDF, utilizando o corte laser e cola branca no processo de manufatura (ver Figura 60). Os parâmetros definidos para o projeto das amostras estão indicados no Quadro 7. A construção totalizou três estruturas com as cavidades e cinco painéis frontais microperfuradas, permitindo a combinação destes elementos, e assim a existência de 15 amostras.

Figura 60 – Amostras manufaturadas em MDF utilizadas na avaliação estatística.



Fonte: O autor.

Quadro 7 – Parâmetros das amostras utilizados no CEP.

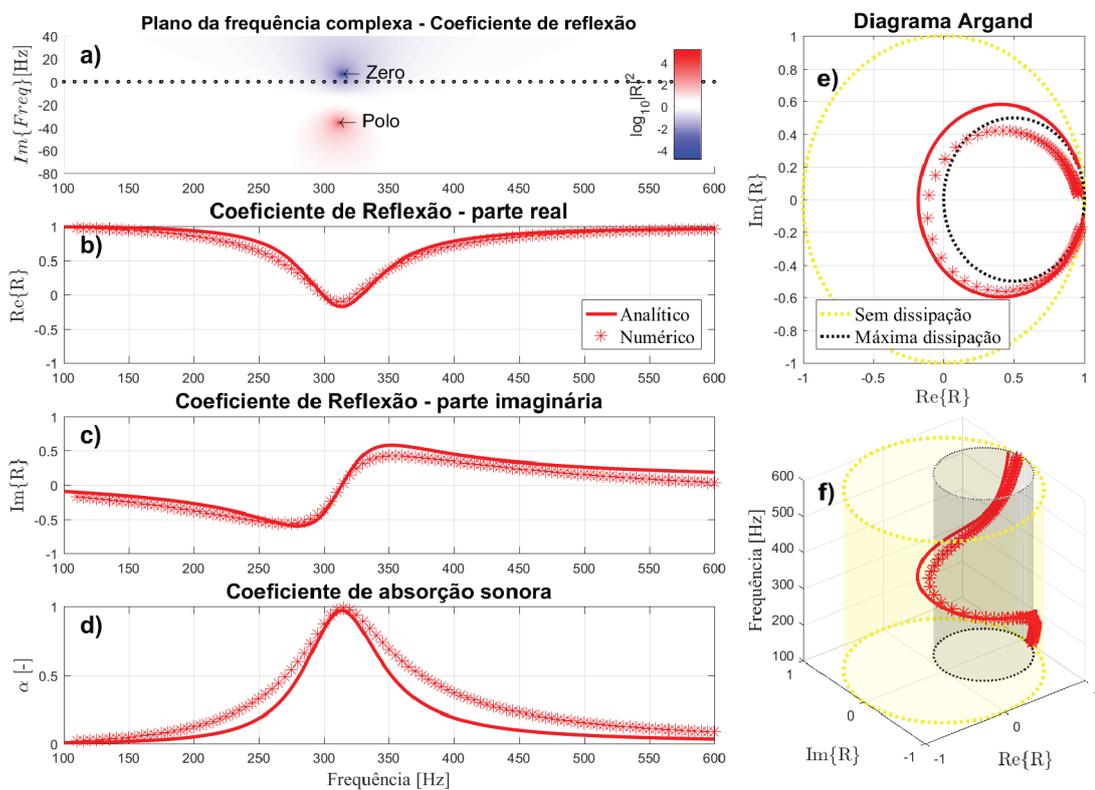
Cavidade						
Material	n	h (mm)	m (mm)	b_0 (mm)	L (mm)	T (mm)
mdf	2	32,5	15	2,9	49,1	3
Painel frontal						
Material	Perfil	t (mm)	d (mm)	L_q	d_f	L_f
mdf	Círculo	2,9	2,0	-	-	-

Fonte: O autor.

O estudo da amostra foi realizado utilizando o modelo analítico para perfuração circular (ver Figura 61). Com este modelo, além do valor da absorção sonora, foi construído o plano de frequência complexa, a parte real, imaginária e o diagrama Argand do coeficiente de reflexão. O plano de frequência complexa (ver Figura 61a), de acordo com Wei *et al.* (2021), permite identificar que a amostra obteve o acoplamento próximo ao crítico, pois o

valor do zero (círculo azul) foi próximo ao valor 0 Hz do eixo de frequência imaginária. Nesse sentido, pode-se analisar o acoplamento utilizando o diagrama argand (ver Figura 61e) formado com valor complexo do coeficiente de reflexão. O círculo preto pontilhado indica o caminho com dissipação máxima, ocorrido quando existe o acoplamento crítico da amostra. Os valores dos modelos analítico e numérico foram próximos à máxima dissipação. Além disso, é possível visualizar o trajeto da dissipação ao longo do eixo das frequências com a Figura 61f. A frequência em que ocorre o pico de absorção para os dois modelos foi em 316 Hz, com valores de 0,97 para o modelo analítico e 0,99 para o modelo numérico.

Figura 61 – Resultado dos modelos analítico e numérico para ensaio de repetibilidade.



Fonte: O autor.

5.2 Avaliação da absorção sonora dos elementos construtivos

As amostras foram avaliadas utilizando o aparato de tubo de impedância por três pessoas, entre as datas de 14 de dezembro de 2022 e 16 de janeiro de 2023, devido a limitações de prazo não foi possível mais pessoas participarem dos ensaios. Todas as medições ocorreram no Laboratório de Vibrações e Acústica, localizado no *Campus* da UFSC em Florianópolis/SC. As informações sobre quem realizou cada conjunto de medições, além das datas e horários estão expressas no Quadro 8, as medições de cada conjunto, com o total de 15 amostras necessitaram cerca de 2h45min.

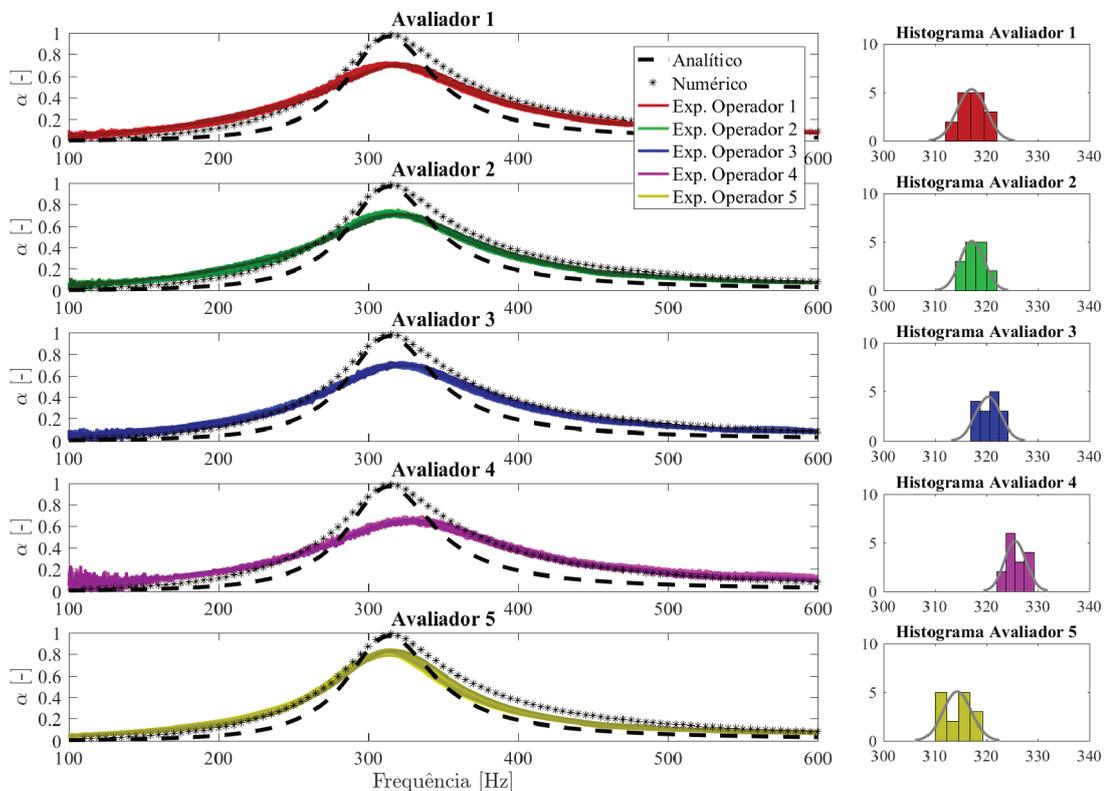
Quadro 8 – Informações sobre os ensaios.

Avaliador	Data	Início	Término	Tempo de ensaio
1	14/12/2022	11:10	14:00	2:50
2	14/12/2022	17:32	20:14	2:42
3	15/12/2022	09:05	11:40	2:35
4	22/12/2022	14:02	16:49	2:47
5	16/01/2023	10:47	13:45	2:58

Fonte: O autor.

A Figura 62 demonstra as curvas de absorção sonora para quinze amostras realizadas por 5 avaliadores, totalizando 75 medições, juntamente com os resultados previstos pelos modelos analítico e numérico (curvas na cor preta). Apesar de existirem variações entre as curvas experimentais, todos os dados coletados ficaram próximos às curvas dos modelos analítico e numérico. Cada conjunto de amostras foram processadas e originaram 5 histogramas com os valores frequentes, juntamente com a curva de distribuição normal. A comparação direta entre os histogramas mostra que apesar de todas as distribuições ficarem próximas à normal, existem diferenças entre os valores médios, indicando que houve diferenças entre os avaliadores.

Figura 62 – Resultados do ensaio de repetibilidade para 5 conjuntos de medições do coeficiente de absorção sonora.



Fonte: O autor.

As curvas experimentais de absorção sonora de todas as 75 amostras foram proces-

sados e o valor da frequência onde ocorre o pico de absorção está demonstrado na Tabela 4, sendo esta a variável utilizada para o controle estatístico das amostras. Foi quantificada a amplitude entre as medições e o valor médio tanto entre os avaliadores como entre as amostras. Para a construção das cartas de controle é esperado que a maioria das variações esteja relacionada aos processos produtivos das amostras e não ao sistema de medição, deste modo é preferível que o valor da amplitude média das amostras seja maior que o valor da amplitude média entre os avaliadores. Entretanto, o processamento indica que a variação média entre as amostras foi de 8,0 Hz, quando avaliado entre os avaliadores o valor foi de 11,6 Hz. Este resultado indica que o conjunto avaliador e montagem do aparato experimental resultam em variações superiores às variações contidas no processo de fabricação e montagem das amostras.

Tabela 4 – Valores das frequências em que ocorrem os picos de absorção para as amostras avaliadas.

Amostra	Avaliador					Amp. Avaliador	Média Avaliador	
	1	2	3	4	5			
X1	316	316	317	323	312	10	316,6	
X2	319	317	317	329	316	13	319,6	
X3	313	314	320	324	312	12	316,6	
X4	315	316	317	323	310	13	316,2	
X5	319	318	322	325	315	10	316,8	
Y1	317	318	321	325	314	11	319	
Y2	315	319	323	328	316	13	320,2	
Y3	315	314	319	324	312	12	316,8	
Y4	315	314	319	324	311	13	316,6	
Y5	314	317	323	327	318	13	319,8	
Z1	322	317	322	328	315	13	320,8	
Z2	320	321	322	325	318	7	321,2	
Z3	318	318	322	326	315	11	319,8	
Z4	318	318	318	327	313	14	318,8	
Z5	322	322	324	328	319	9	323	Média
Amp. Amostras	9	8	7	7	9	-	-	8
Média Amostras	317,2	317,3	320,4	325,7	314,4	-	-	319,0
						Média	11,6	319,0

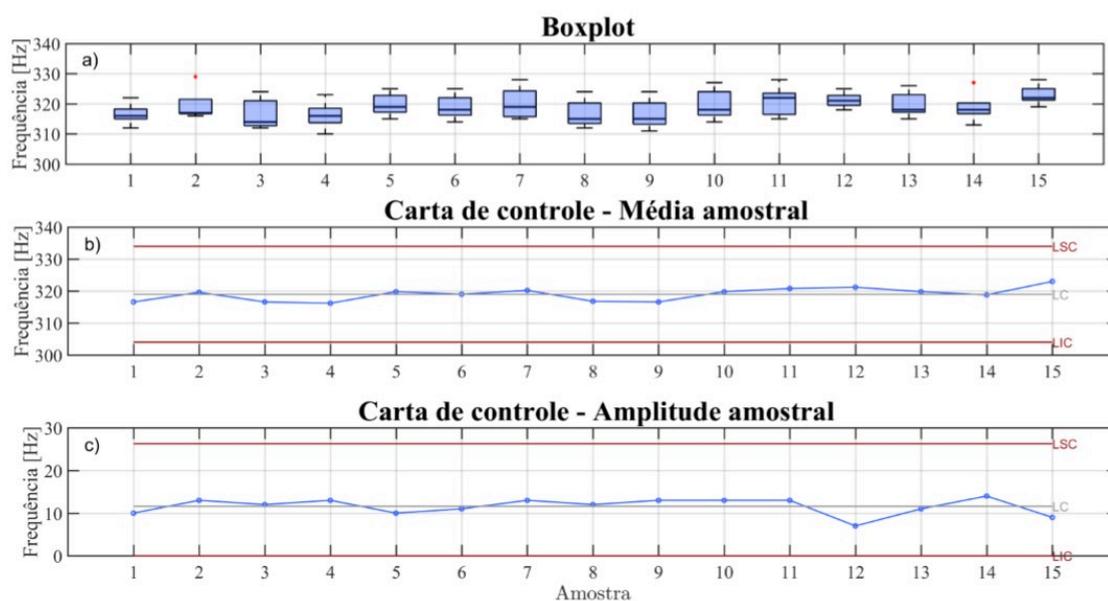
Fonte: O autor.

5.3 Cartas de controle

As cartas de controle permitem que visualmente seja determinado se as amostras produzidas estão sob controle estatístico para duas situações, variações entre o valor médio e variação entre a amplitude dos valores. A figura 63a indica o *boxplot* dos dados coletados para cada amostra, é possível visualizar a existência de dois *outliers* para todo grupo de amostras. Os limites das cartas de controle têm como base as médias e amplitudes para o grupo de amostras (dados contido na Tabela 4), deste modo não é considerado no cálculo o valor máximo especificado de variação. Esses valores são estabelecidos com

a suposição que exista uma distribuição normal dos dados, resultando em $\pm 3\sigma$ para os limites de controle (ver Equação 2.21 e Equação 2.23). Os limites de controle foram determinados para o conjunto de dados e estão plotados, as Figura 63b e Figura 63c demonstram, respectivamente, a carta de controle para o valor médio e a carta de controle para a amplitude. A linha LC representa o valor médio e a amplitude média para todas as 75 amostras, cada ponto azul representa a média dos 5 avaliadores para cada amostra.

Figura 63 – Boxplot e Cartas de controle.



Todas as 15 amostras avaliadas permaneceram com valores dentro das linhas de controle, para as cartas de média e amplitude, com valores variando próximo à linha central, indicando que a amostra está sob controle estatístico quanto ao processo de manufatura e aferição. Entretanto, foi percebido que existiu grande variação para cada amostra, perceptível pela distância das linhas de controle com o valor médio das amostras, apontando que o conjunto sistema de medição e avaliador adicionou variação aos resultados superiores à variação natural do processo de manufatura. Com isto fica evidenciado que a elevada sensibilidade dos equipamentos exigem que procedimentos mais controlados sejam seguidos para reduzir a variabilidade dos resultados avaliados.

5.4 Teste de normalidade e análise de capacidade

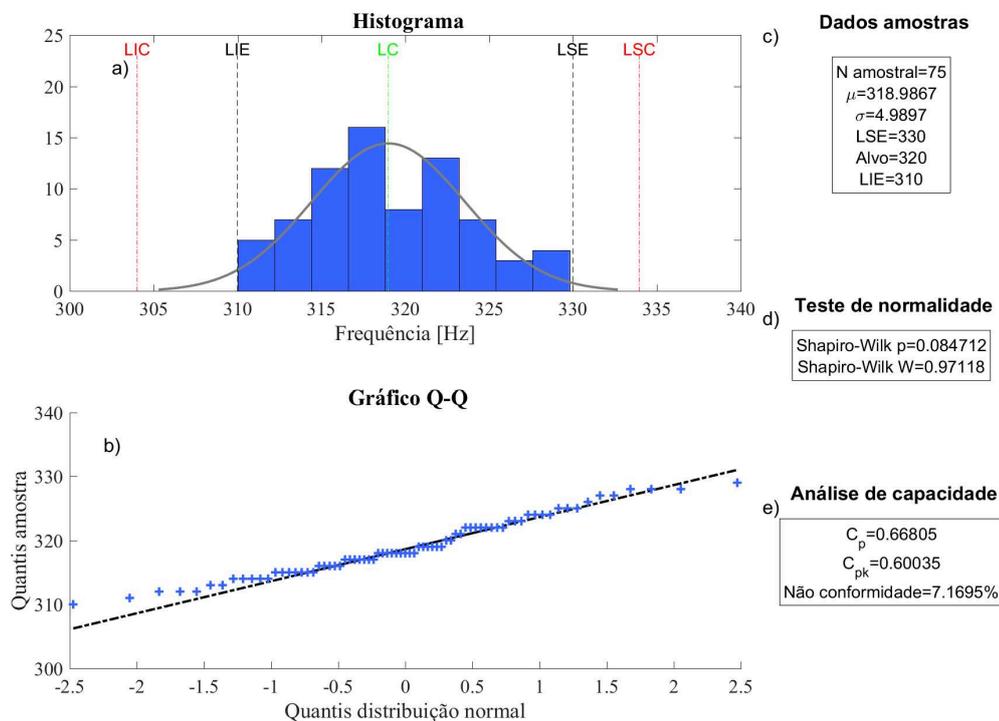
A análise de capacidade (probabilidade da amostra atingir os limites de especificação) deve ser precedida por um teste de normalidade. Deste modo, a existência de distribuição normal dos valores utilizados para o processamento deve ser garantida, resultando na confiabilidade do resultado da análise de capacidade. Nestes termos, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, resultando em um valor $p=0,085$ para as 75 amostras.

Com isso é aceita a hipótese nula (H_0), $p > 0,05$ que para este teste considera que os valores seguem uma distribuição normal. Além disso, a correspondência dos quantis das amostras com os quantis da distribuição normal, demonstrada na Figura 64b reforça a normalidade dos dados coletados.

Os parâmetros contidos na análise de capacidade foram calculados pelas Equação 2.26 e Equação 2.27. Para isso, foi necessário especificar o valor alvo e os limites aceitos de variação, denominados limites de especificação. Para este estudo, foi projetado que a frequência onde ocorre o pico de absorção seria de 320 Hz, com tolerância de ± 10 Hz. Os índices de capacidade $C_p = 0,668$ e $C_{pk} = 0,600$ foram determinados e indicam:

- O valor médio das medições foi levemente fora do valor alvo;
- O processo resultou em baixo valor de capacidade para os limites especificados;
- Para os limites estabelecidos (± 10 Hz), cerca de 7,17% do processo não atinge as especificações.

Figura 64 – Histograma e análise de capacidade.



Fonte: O autor.

Apesar do baixo valor da análise de capacidade (C_{pk}), as variações foram pequenas quando analisado em cada grupo de avaliadores. Entretanto, quando comparado entre os grupos de avaliadores, os valores médios foram dispersos, indicando que a maior fonte

de erros está no ajuste inicial do aparato de medição (tubo de impedância). A partir do ajuste inicial das medições, os valores aferidos demonstraram baixa variação.

5.5 Ajuste dos valores

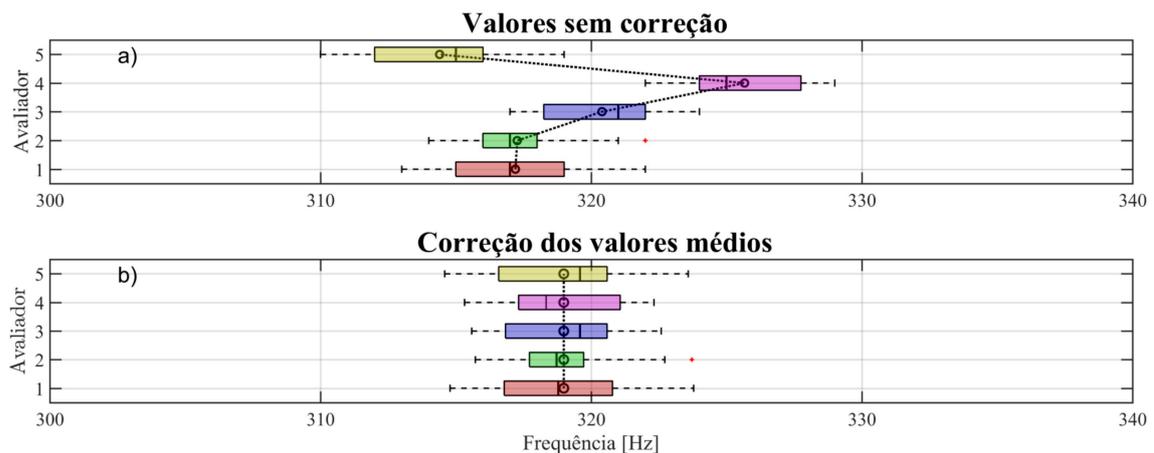
Os efeitos da dispersão dos resultados entre os avaliadores foram tratados com um novo processamento dos dados coletados. Para isso, foi determinado o valor médio de cada grupo de avaliadores, o ajuste (β_n) foi aplicado seguindo a Equação:

$$\beta_n = \bar{x} - \bar{x}_n, \tag{5.1}$$

onde \bar{x} representa a média total e \bar{x}_n a média para cada avaliador.

O *boxplot* dos dados de medição para cada avaliador sem aplicação da correção está representado da Figura 65a. Após somado o fator de ajuste β_n para cada grupo de medição, o *boxplot* é demonstrado na Figura 65b. Os grupos modificaram apenas seu valor médio, a distribuição de valores dentro de cada grupo assim como a amplitude não foram alterados. Com isso, buscou-se anular apenas os efeitos do ajuste inicial do aparato experimental, aplicando a respectiva correção para cada grupo de 15 medições. Deste modo, as variações originadas nos processos de produção das amostras de MMA não foram modificadas, visto que foi somado o mesmo valor para todas as amostras de cada grupo.

Figura 65 – *Boxplot* do valor da frequência pico com os valores médios para cada avaliador, sem e com o ajuste proposto.

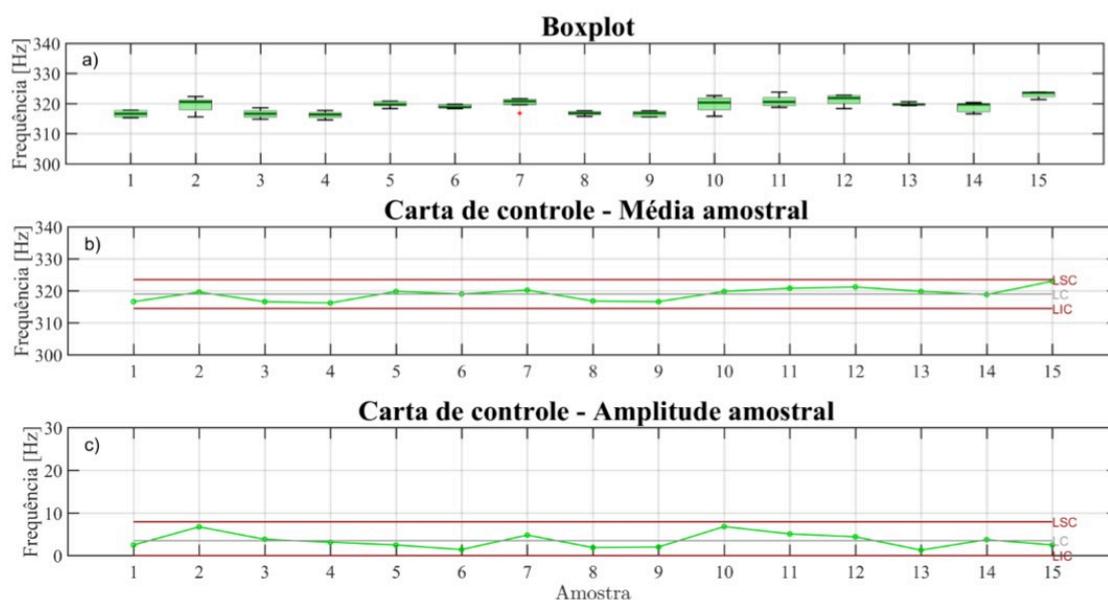


Fonte: O autor.

Os limites das cartas de controle têm como base as médias e amplitudes para o grupo de amostras (dados contido na Tabela 4). Assim, não é considerado no cálculo o valor máximo especificado de variação. Os limites são estabelecidos com a suposição que exista uma distribuição normal entre os dados, seus valores são de $\pm 3\sigma$ (ver Equação 2.21 e Equação 2.23).

Após aplicadas as correções, um novo conjunto de *boxplot* para o grupo das 15 amostras foi gerado (ver Figura 66a). Estes dados serviram como fonte para o cálculo de um novo par de cartas de controle, com os novos limites de controle determinados para o conjunto de valores ajustados (ver Figura 66b e Figura 66c). Como foi reduzida a variação entre os avaliadores, é possível perceber a menor variação entre os valores das amostras, visível pela menor amplitude dos *boxplot* e pela proximidade das linhas superiores e inferiores de controle, quando comparado com as amostras anteriores (ver Figura 63).

Figura 66 – Boxplot e cartas de controle.

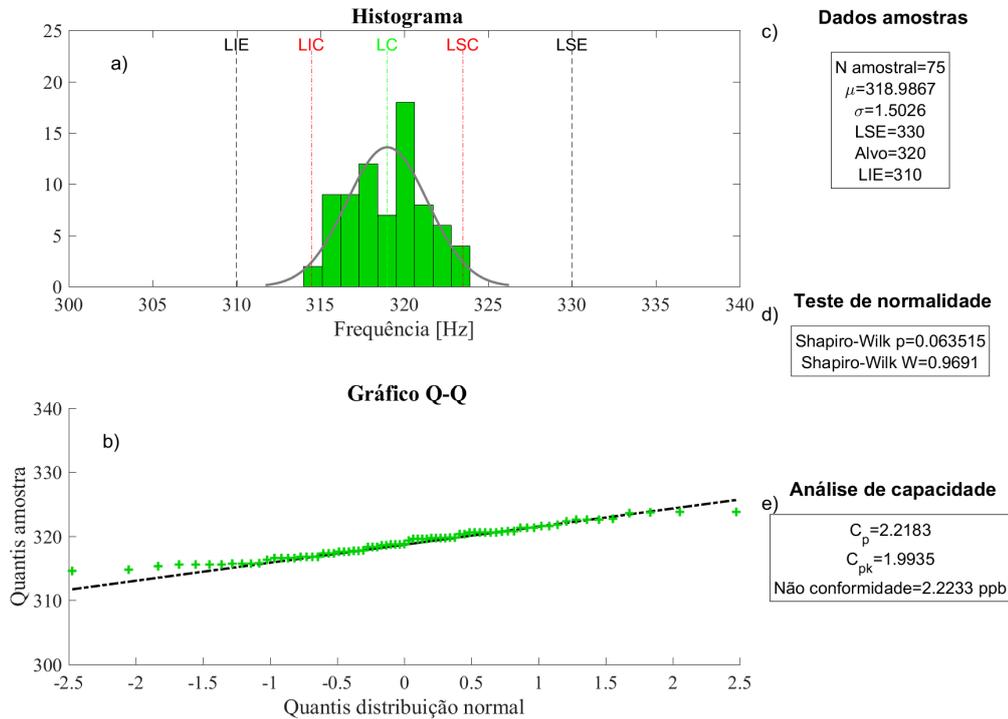


Fonte: O autor.

Na sequência, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk para determinar a normalidade dos dados ajustados, resultando em um valor $p=0,063$, segundo o teste, para $p>0,05$ os dados são considerados que seguem uma curva de distribuição normal. Outrossim, a Figura 67a demonstra o histograma dos valores corrigidos juntamente com a curva de distribuição normal, a Figura 67b representa o gráfico Q-Q, onde são comparados os quantis dos dados utilizados para o estudo com os valores da curva de distribuição normal. Em ambos gráficos é possível perceber que as amostras seguem esta distribuição. Com a garantia da normalidade dos dados, foi realizada a análise de capacidade para os dados corrigidos, como resultado os índices $C_p=2,21$ e $C_{pk}=1,99$ indicam:

- O valor médio das medições foi muito próximo ao valor alvo;
- O processo resultou em elevado valor de capacidade para os limites especificados;
- Para os limites estabelecidos (± 10 Hz), cerca de 2,2 itens do processo a cada bilhão não atingem as especificações.

Figura 67 – Histograma e análise de capacidade.



Fonte: O autor.

Os resultados para as amostras com a correção do valor médio mostram que para os limites de especificados, o processo de projeto, corte e montagem das amostras possui baixa variabilidade, fortalecendo o emprego da técnica de corte a laser para manufatura de amostras de metamaterial acústico. Entretanto, foi encontrado problema no sistema de medição, especificamente no ajuste inicial dos equipamentos que fazem parte do ensaio de tubo de impedância, descoberto pela elevada variabilidade dos valores médios entre os avaliadores. Além disso, como a variabilidade entre cada grupo de medição dos avaliadores foram próximas, são descartados defeitos dos equipamentos ou vieses dos avaliadores que poderiam adicionar distorções aos resultados. Por fim, com a situação avaliada, para aumentar ainda mais o valor do índice C_{pk} , deve-se melhorar o procedimento de configuração inicial do aparato de tubo de impedância, podendo ser criado um POP (Procedimento Operacional Padrão), onde neste documento além de descrito as potências, temperaturas e demais parâmetros para cada *softwares* e instrumentos, seja previsto o ajuste inicial dos equipamentos com a utilização de uma amostra padrão.

6 Resultados e Discussões

A tecnologia empregada no projeto e construção dos metamateriais permite a combinação de um elemento com cavidades e um painel microperfurado para formar cada amostra. Para facilitar essas combinações, é atribuído um código alfabético para as cavidades (ver Quadro 9) e um código numérico para os painéis microperfurados construídos (ver Quadro 10). Cada amostra utilizada para o estudo tem seu nome formado por uma letra e um número, representando seus elementos constituintes.

Quadro 9 – Parâmetros utilizados para dimensionamento das cavidades das amostras.

Cavidade							
Código	Material	n	h (mm)	m (mm)	b_0	L (mm)	T (mm)
A	MDF	2	32,5	15	2,9	49,1	3
C	MDF	1	31,1	15	2,9	49,1	3
D	Acrílico	2	32,5	15	2,9	49,1	3
F	MDF	3	33,7	15	2,9	49,1	3
G	MDF	4	33,7	15	2,9	49,1	3

Fonte: O autor.

Quadro 10 – Parâmetros utilizados para dimensionamento dos painéis frontais das amostras.

Painel frontal							
Código	Material	Perfil	t	d	x	d_f	L_f
27	MDF	Fenda	2,90	-	-	0,50	5,90
28	MDF	Fenda	2,90	-	-	0,40	5,90
29	MDF	Fenda	2,90	-	-	0,30	5,90
31	MDF	Fenda	3,10	-	-	0,60	5,90
32	MDF	Fenda	3,10	-	-	0,80	5,90
33	MDF	Fenda	3,10	-	-	1,00	5,90
34	MDF	Fenda	3,10	-	-	1,20	5,90
60	MDF	Fenda	3,10	-	-	1,40	5,90
61	MDF	Fenda	3,10	-	-	1,60	5,90
62	MDF	Fenda	3,10	-	-	1,80	5,90
98	MDF	Quadrado	2,90	-	2,30	-	-
99	MDF	Quadrado	2,90	-	3,55	-	-
100	MDF	Quadrado	2,90	-	4,80	-	-
111	MDF	Circular	2,90	2,00	-	-	-
112	MDF	Quadrado	2,90	-	1,80	-	-
113	MDF	Fenda	2,90	-	-	0,70	4,40
114	MDF	Circular	2,90	2,50	-	-	-
115	MDF	Quadrado	2,90	-	2,2	-	-
116	MDF	Fenda	2,90	-	-	0,52	4,4

Fonte: O autor.

Com o objetivo de determinar as diferenças entre as variáveis estudadas, foram planejadas diversas amostras cujos resultados serão apresentados a seguir. No entanto, algumas amostras foram fabricadas e avaliadas ao longo do estudo para verificar detalhes específicos de fabricação, medição ou validação dos modelos analíticos e numéricos, e esses

resultados estão demonstrados no Apêndice D, o qual inclui breves discussões sobre o assunto.

6.1 Diferentes materiais

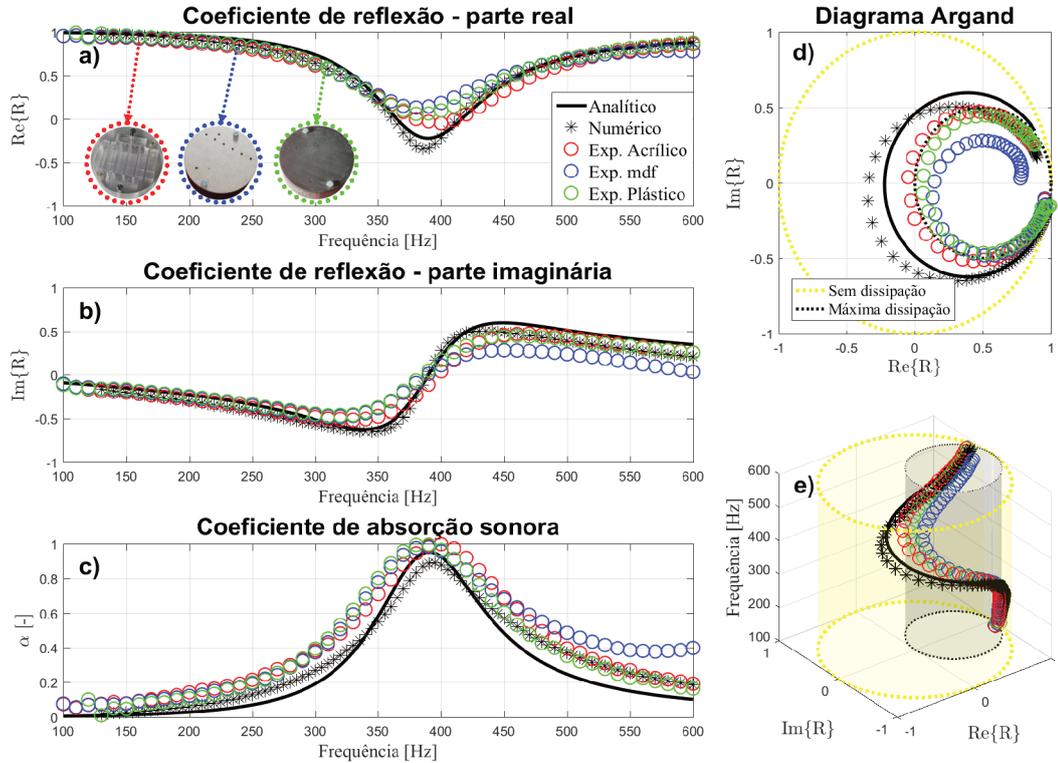
Foi investigado o efeito da matéria-prima no desempenho do metamaterial construído. Utilizando a técnica de corte laser para fabricação, foram construídas amostras em MDF (Amostra A98) e Acrílico (Amostra D98), com os parâmetros correspondentes a esses códigos expostos nos Quadros 9 e 10. Além disso, também foi avaliado e comparado o resultado com uma amostra fabricada pela técnica de impressão 3D. Essa técnica é conhecida pela produção de amostras de MMA e foi utilizada por Wang *et al.* (2018a) e também empregada por Almeida (2019) e Farias (2021) para manufatura de suas amostras para seus trabalhos de mestrado e artigos posteriores. Os parâmetros para construção da amostra em plástico utilizando a impressão 3D seguiram as mesmas dimensões da amostra A98.

Os resultados experimentais das três amostras estudadas estão apresentados na Figura 68. As dimensões são iguais entre as amostras, como os modelos dependem apenas destes parâmetros, foi plotado apenas uma curva para cada um dos modelos teórico e numérico. O resultado da absorção sonora, contido na Figura 68c, demonstra que o desempenho das amostras foi semelhante, todas com pico de absorção em cerca de 390 Hz e pico de absorção de 1,00, 0,99 e 0,99 para as amostras em acrílico, MDF e plástico, respectivamente. Como já estudado na seção anterior, são esperadas e aceitas algumas diferenças nos resultados devido ao processo de manufatura. Deste modo, os valores obtidos estão dentro da margem de semelhança. Além disso, entre as tecnologias para produção das amostras (corte laser x impressão 3D), vale destacar que, quanto ao desempenho das amostras, não foram visualizadas diferenças significativas.

O diagrama Argand é apresentado na Figura 68d para o coeficiente de reflexão complexo e na Figura 68e foi plotado o coeficiente de reflexão complexo ao longo da frequência. Ao analisar, é possível perceber que as curvas experimentais obtiveram resultados próximos ao valor perfeito de absorção sonora. O maior valor foi obtido para a amostra de acrílico, seguida do plástico e MDF.

Foi utilizado o procedimento de pós-processamento dos dados experimentais, como descrito na seção 4.3.4, a fim de possibilitar a comparação dos resultados com os modelos numéricos e experimentais, pelo fato de ambos considerar a amostra com área de aproveitamento máxima. No Apêndice C são disponibilizados os resultados experimentais brutos, sem qualquer pós-processamento.

Figura 68 – Comparativo dos resultados de amostras construídas com diferentes materiais com perfuração quadrada. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



Fonte: O autor.

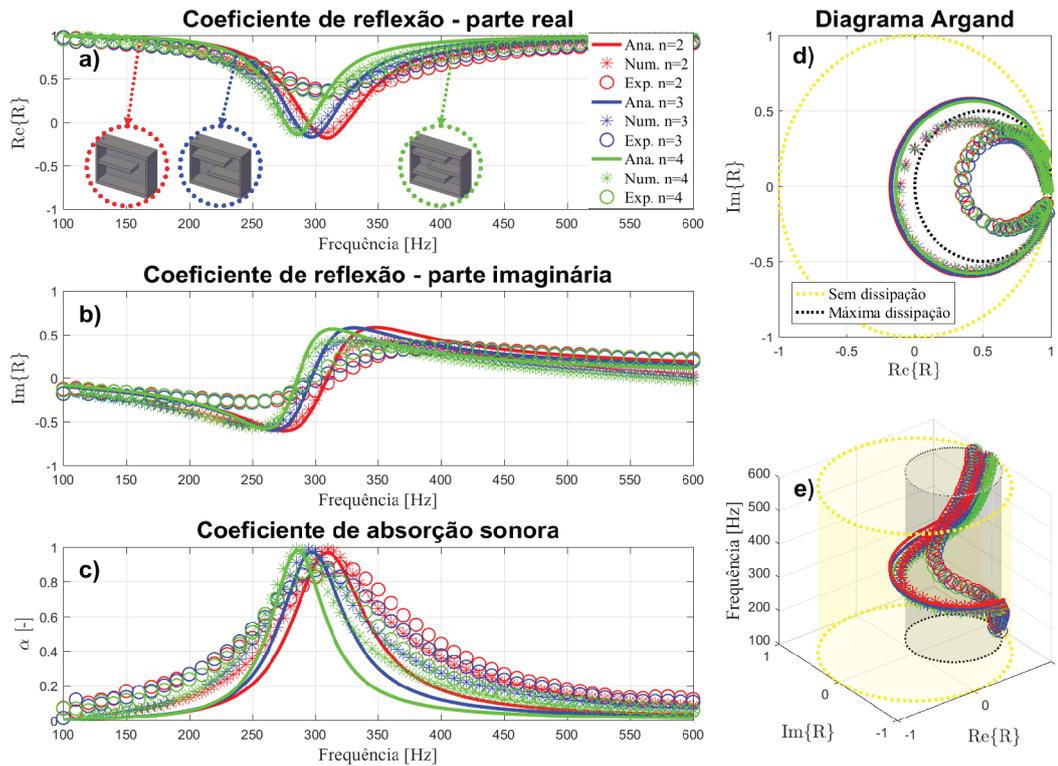
6.2 Comparativo da influência do enrolamento

O valor da impedância acústica da cavidade de espaço enrolado, conforme a Equação 2.8, depende diretamente do valor do comprimento efetivo de propagação (L_{ef}). Esse valor pode ser elevado simplesmente aumentando o comprimento das cavidades de metamaterial (L), mas com isso aumentam-se as dimensões da estrutura, característica muitas vezes indesejada. Dessa forma, o modelo de metamateriais de espaços enrolados permite que o número de enrolamentos seja elevado para aumentar o comprimento efetivo de propagação. Isso pode permitir alcançar impedâncias diferentes da cavidade, permitindo ao material atuar com maior efetividade em baixas frequências.

A determinação experimental da influência do enrolamento no desempenho da absorção sonora foi verificada pela construção de três amostras com frequências de pico de absorção próximas aos 300 Hz, mantendo-se constante a altura interna das cavidades (h), em cerca de 33,0 mm. A Figura 69 apresenta os resultados para as amostras construídas com perfuração circular, identificadas pelos códigos A111, F111 e G111, para as amostras com enrolamentos $n=2$, $n=3$ e $n=4$, respectivamente. As dimensões exatas das amostras

utilizadas para o projeto e utilização dos modelos estão disponíveis nos Quadros 9 e 10.

Figura 69 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes enrolamentos com perfuração circular. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



Fonte: O autor.

Os gráficos apresentados ns Figura 69 ilustram o coeficiente de reflexão sonora, a absorção sonora, e os diagramas de Argand 2D e 3D para o coeficiente de reflexão. Ao analisar as curvas da figura d, os diagramas Argand indicaram perdas próximas do máximo para todas as amostras planejadas, independentemente do grau de enrolamento. A Tabela 5 fornece uma análise complementar ao demonstrar os valores para três indicadores das curvas de absorção para as amostras, sendo: valor da frequência onde ocorre o pico de absorção, valor máximo de absorção e largura de absorção em 50%. Os resultados mostraram proximidade entre os valores da frequência onde ocorre o pico de absorção, quando comparado os valores dos modelos analítico, numérico e experimental para cada amostra. Este resultado indica convergência do desempenho entre os modelos para cada amostra. No que diz respeito ao grau de enrolamento, observou-se que as amostras com enrolamento $n=4$ (curva verde), resultaram em um pico de absorção cerca de 20 Hz para as baixas frequências, quando comparadas com amostras com $n=2$ (curva vermelha).

Os resultados apresentados pela Figura 69 demonstraram valores próximos para todos os gráficos gerados, exibindo a tendência esperada: o aumento do enrolamento da

Tabela 5 – Síntese das curvas comparando diferentes valores de enrolamento.

Amostra	Freq. pico [Hz]	α pico	Largura de 50% [Hz]
Ana. n=2	310	0,97	72
Num. n=2	310	0,99	100
Exp. n=2	319	0,89	134
Ana. n=3	298	0,97	62
Num. n=3	295	0,99	90
Exp. n=3	300	0,87	124
Ana. n=4	287	0,98	55
Num. n=4	285	0,98	80
Exp. n=4	297	0,88	106

Fonte: O autor.

amostra resultou em uma redução na frequência do pico de absorção. Entretanto, no que diz respeito à frequência onde ocorre o pico de absorção, os resultados experimentais se mostram menos sensíveis ao efeito do enrolamento. As amostras com $n=3$ (curva azul) e $n=4$ (curva verde) apresentaram valores bastante próximos, sendo 300 Hz e 297 Hz, respectivamente. Wang *et al.* (2018a) examinaram em seu trabalho o efeito do enrolamento, mas não realizaram ensaios experimentais sobre este efeito, limitando-se a usar dados de modelos teóricos e de simulação. Seus resultados indicaram que com aumento do enrolamento e, conseqüentemente, do comprimento efetivo de propagação, o pico é deslocado para frequências mais baixas. Por outro lado, o resultado experimental demonstrado na Tabela 5, com $n=4$, não seguiu a tendência de redução da frequência. Existem algumas hipóteses que, individualmente ou em combinação, poderiam justificar o comportamento experimental observado.

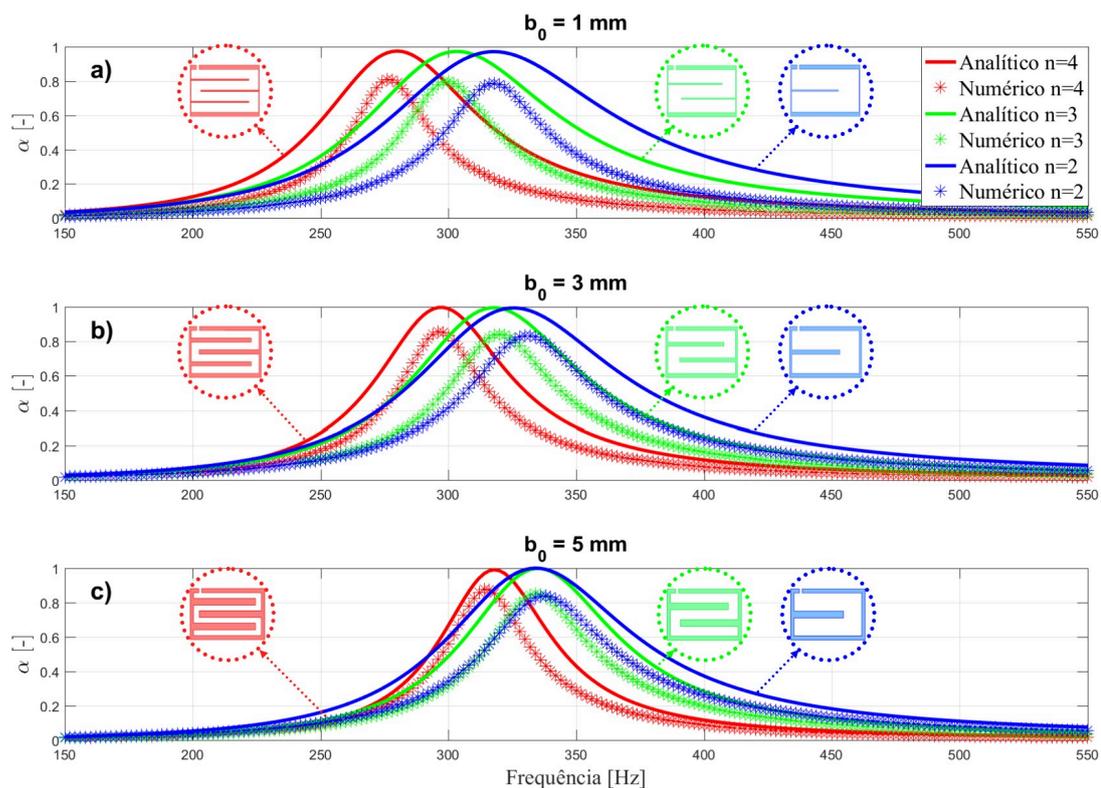
A primeira hipótese capaz de explicar o comportamento experimental observado está associado ao vazamento de som no interior das cavidades. Este efeito pode criar trajetos adicionais internos para a propagação da onda sonora, atenuando os impactos dos enrolamentos e, por conseqüência, simulando o efeito de uma amostra com menor enrolamento. Isso pode acontecer devido a possíveis vazamentos no material usado para construir as amostras ou à presença de espaços vazios entre as cavidades que permitem o vazamento de som. Essa hipótese pode ser verificada por meio de medições de isolamento acústico e análise do comportamento do som em diferentes frequências e posições na amostra.

A segunda hipótese está associada ao valor de b_0 igual a 3 mm empregado nas amostras fabricadas com o laser, especialmente no que diz respeito às camadas de material que separam os enrolamentos dentro da mesma cavidade. O incremento do enrolamento requer mais camadas de material para realizar a separação, o que conseqüentemente reduz o valor da seção transversal do metamaterial S_1 . Como a camada que separa as cavidades é composta quase integralmente por material rígido, ela não participa dos fenômenos responsáveis pela absorção acústica. Assim, a cada incremento do enrolamento, o volume interno total da cavidade é reduzido, o que pode resultar em uma diminuição da absorção

sonora. Este efeito pode ser mais perceptível para amostras fabricadas com o laser de 3 mm, nas quais as camadas de separação apresentam valores superiores aos normalmente utilizados para amostras produzidas com técnicas de impressão 3D (1 mm).

Os efeitos da espessura das camadas que separam os enrolamentos no interior das cavidades foram investigados por meio do modelo teórico e de simulação para três conjuntos de valores de espessuras, e os resultados são apresentados na Figura 70. Para analisar apenas a influência da espessura das camadas que separam os enrolamentos, o valor da altura interna do metamaterial h foi mantido constante. No entanto, foi necessário variar os valores de m e L , uma vez que as dimensões internas das cavidades dependem do valor de b_0 . Assim, para todas as amostras analisadas, as larguras e comprimentos internos das cavidades permaneceram constantes.

Figura 70 – Comparativo dos valores de absorção sonora para os modelos analítico e numérico com variação do valor de b_0 para amostras com perfuração quadrada e dimensões: $L_q = 2,0$ mm; $t = 3,0$ mm; $h = 32,0$ mm; $T = 5,0$ mm. a) $L = 48,0$ mm; $m = 13,0$ mm; $b_0 = 1,0$ mm. b) $L = 50,0$ mm; $m = 15,0$ mm; $b_0 = 3,0$ mm. c) $L = 52,0$ mm; $m = 17,0$ mm; $b_0 = 5,0$ mm.



Fonte: O autor.

Os resultados obtidos indicam que, ao aumentar o valor de b_0 , a efetividade do enrolamento é reduzida, mantendo-se constante a altura da cavidade. Isso ocorre porque a camada que separa as cavidades é composta de um material rígido que não participa da absorção sonora do metamaterial. Na Figura 70 a), que compara os resultados para amostras com dimensões de 1 mm, observa-se que o aumento do enrolamento de $n=2$

para $n=4$ resulta em cerca de 40 Hz de deslocamento para frequências mais baixas. A Figura 70 b), que compara os resultados para amostras com camada de separação de 3 mm, percebe-se menor deslocamento entre os enrolamentos, com cerca de 30 Hz quando variado de $n=2$ para $n=4$. Por fim, na Figura 70 c), a espessura da camada foi extrapolada para 5 mm, verificando-se que as diferenças entre os enrolamentos foram menores, com cerca de 20 Hz para amostras com $n=2$ e $n=4$. No entanto, quando comparadas as amostras com enrolamento $n=2$ e $n=3$, a espessura de 5 mm resultou em desempenhos muito próximos.

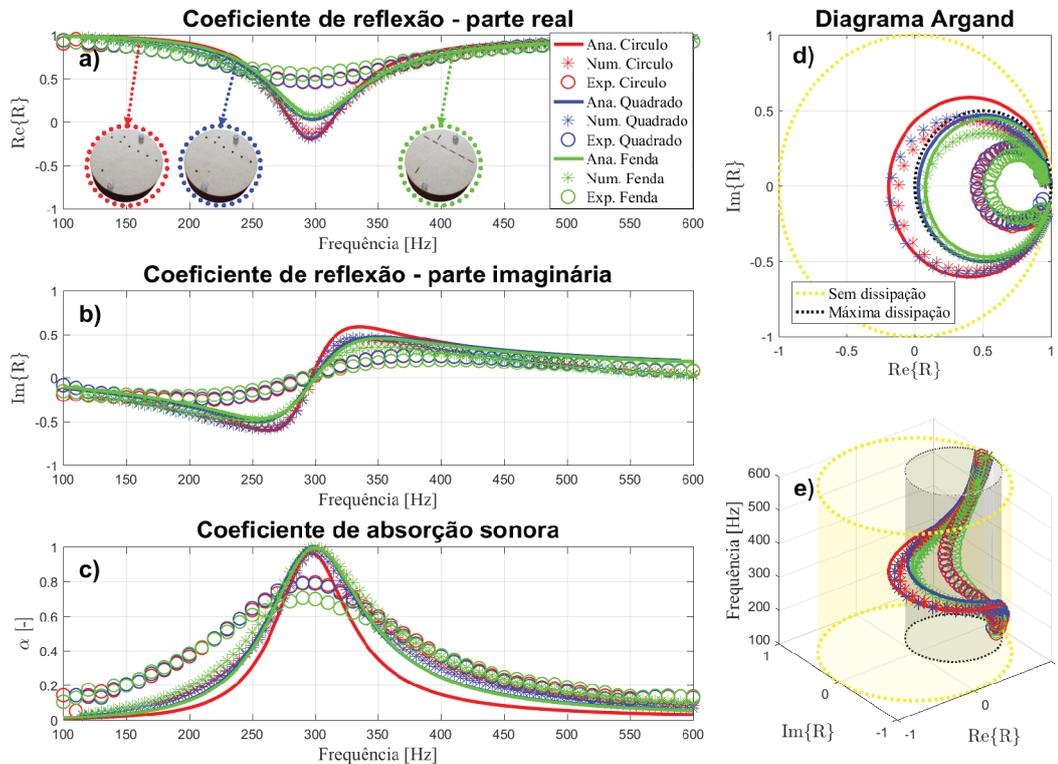
6.3 Comparativo entre perfurações

Foram criadas amostras com diferentes tipos de perfurações, todas sintonizadas na mesma frequência. Essas amostras foram fabricadas por meio de corte a laser e receberam os seguintes códigos A111, A112 e A113, correspondendo às amostras com perfuração circular, quadrada e fenda, respectivamente. Os detalhes sobre as dimensões utilizadas na montagem das amostras podem ser encontrados nos Quadros 9 e 10. Essa abordagem possibilita a comparação da eficiência de cada perfil de perfuração e investigação dos mecanismos responsáveis pela dissipação de energia.

Os resultados dos modelos analíticos, numéricos e experimentais são ilustrados na Figura 71. Todas as curvas obtidas mostraram o pico de absorção sonora em frequências próximas de 300 Hz. Ao analisar os valores de absorção sonora (ver Figura 71c), nota-se que os resultados dos modelos analíticos e numéricos indicam uma absorção sonora próxima de 100%, enquanto os resultados experimentais, com uma variação entre 70% e 80%, são inferiores. Esse comportamento pode ser atribuído às características construtivas das amostras experimentais, onde uma parcela da dissipação é decorrente da porosidade dos materiais constituintes, um fator que não é considerado nos modelos teóricos e que altera o comportamento das curvas. A absorção adicional poderia explicar não apenas a redução do pico de absorção, mas também o maior valor de absorção das amostras experimentais fora da região de sintonia da amostra, apresentando para a perfuração circular cerca de 40% de absorção no resultado experimental para a frequência de 200 Hz (curva vermelha), enquanto para o modelo analítico da mesma frequência e amostra, seria esperado aproximadamente 8% de absorção (ver Figura 72). No entanto, a absorção adicional altera o comportamento da curva experimental, principalmente na região do pico de absorção, reduzindo o valor máximo de absorção. Essa característica foi discutida na Seção 4.2, onde foi adicionado e variado um valor de impedância na curva de desempenho teórica da amostra.

Os indicadores de desempenho das curvas, conforme expressos pela Tabela 6, demonstram que todas as amostras, em diferentes modelos de absorção sonora, apresentaram frequência de pico próxima a 300 Hz, com os modelos analíticos e numéricos atingindo

Figura 71 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com $n=2$ sintonizadas para frequência de 300 Hz. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



Fonte: O autor.

pico de absorção próximo ao valor unitário. Valores semelhantes foram obtidos para as perfurações circular e quadrada, respectivamente com 80% e 79%. No entanto, a perfuração fenda resultou em um valor mais baixo, de 69%. Embora seja a geometria que proporciona uma maior faixa de absorção, conforme discutido no Capítulo A.1 (Análise de Sensibilidade), o desempenho da perfuração fenda depende bastante da menor dimensão da perfuração (d_f), fazendo com que pequenas imperfeições no processo de fabricação resultem em uma redução na qualidade dos resultados obtidos. Os valores da largura de absorção em 50% indicam que os resultados experimentais superaram os valores dos modelos analíticos e numéricos para as três perfurações, sugerindo que a absorção adicional atribuída ao material constitutivo da amostra pode elevar o desempenho da curva de absorção sonora.

Por meio do modelo numérico desenvolvido no COMSOL foi possível mapear os campos de pressão acústica e velocidade de partícula para as três diferentes perfurações analisadas, especialmente na frequência de 400 Hz, onde se observa o pico de absorção sonora. Esses resultados estão detalhadamente ilustrados na Figura 72. As figuras a), b) e c) revelam que, na área externa à perfuração, a pressão acústica se mantém aproximadamente

Tabela 6 – Síntese dos indicadores de desempenho das curvas para as perfurações: circular, quadrada e fenda.

Amostra	Freq. pico [Hz]	α pico	Largura de 50% [Hz]
Ana. Círculo	297	0,96	69
Num. Círculo	300	0,99	105
Exp. Círculo	297	0,80	142
Ana. Quadrado	299	1,00	95
Num. Quadrado	300	0,97	95
Exp. Quadrado	298	0,79	142
Ana. Fenda	300	0,99	95
Num. Fenda	300	0,99	120
Exp. Fenda	299	0,69	132

Fonte: O autor.

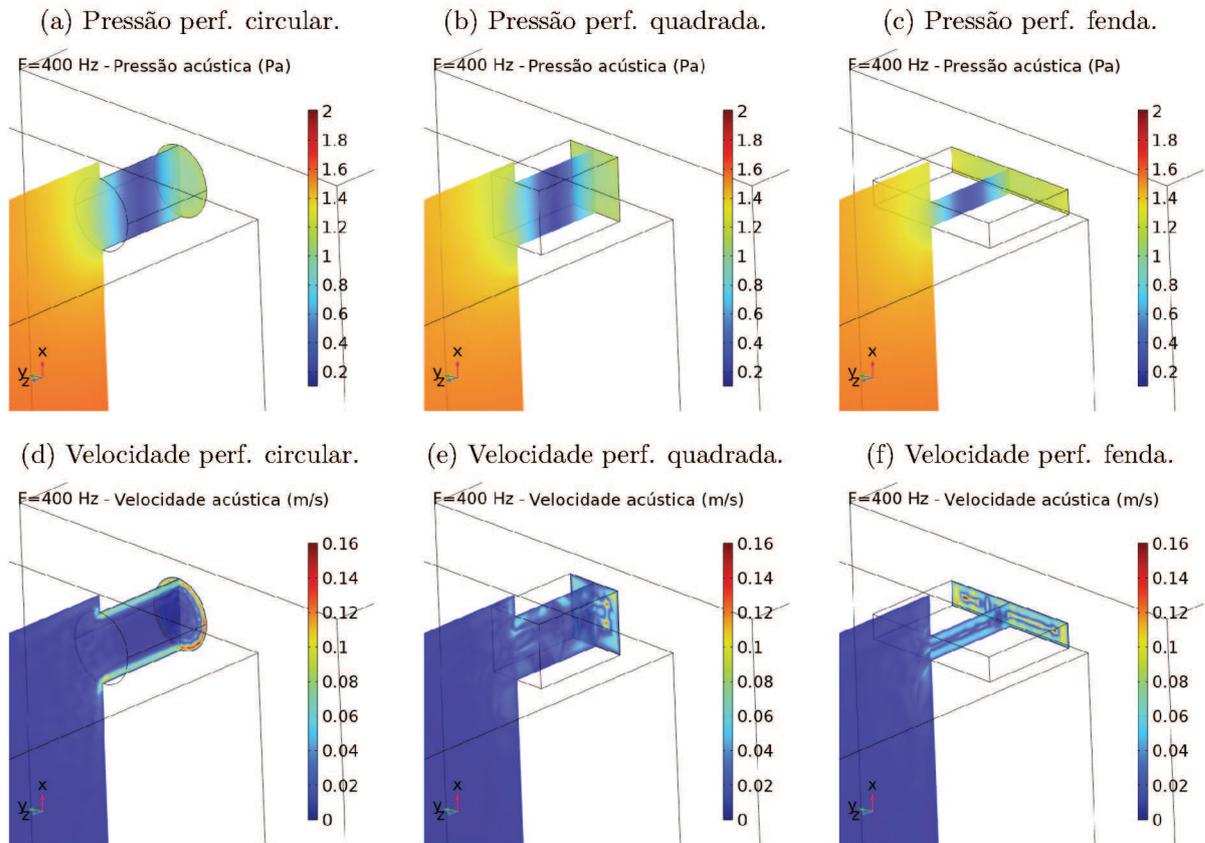
em 1 Pa para todas as amostras. No entanto, essa pressão não permanece constante ao longo da estrutura, observando-se um notável incremento dentro das cavidades. Este fenômeno concorda com observações anteriores de Jin *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2018b) de que o pico de pressão é frequentemente identificado na parede mais rígida e distante da perfuração, especificamente no interior do espaço enrolado. A interpretação desses gráficos é essencial para entender a distribuição de pressão do som no metamaterial, permitindo encontrar soluções geométricas para otimização das geometrias (LIU *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2018).

As Figuras 72 d), e) e f) ilustram o módulo da velocidade na região das perfurações para os perfis circular, quadrado e fenda, respectivamente. De acordo com Guo *et al.* (2020), é esperado que a primeira camada de fluido em contato com as paredes esteja em repouso devido ao fenômeno de forte cisalhamento de velocidade perto das paredes no interior das perfurações. Nessa região, o movimento subsequente do fluido é evidente, atingindo valores máximos de 0,16 m/s, corroborando com a observação de Chen *et al.* (2020) de que a velocidade do ar tem uma amplitude relativamente grande na perfuração do metamaterial. O fenômeno do bombeamento de fluido apresenta características distintas entre as perfurações, refletindo as diferenças no comportamento das amostras. A análise desses campos de velocidade, conforme indicado por Chen *et al.* (2019), é fundamental para compreender a absorção acústica de diferentes geometrias de perfurações e, conseqüentemente, otimizar o desempenho dos absorvedores de som.

Finalmente, foi realizada uma análise da energia de dissipação termo-viscosa, expressa em W/m^3 , para os três diferentes perfis de perfuração (ver Figura 73). Observou-se que a energia dissipada nas amostras é concentrada predominantemente nas regiões de perfuração. Este fenômeno, conforme discutido por Guo *et al.* (2020), ocorre majoritariamente por meio de efeitos viscosos, embora haja uma contribuição não negligenciável dos efeitos térmicos, conforme a literatura existente (ALMEIDA *et al.*, 2021).

É importante ressaltar, como destacado por Tang *et al.* (2017), que embora os efeitos térmicos tenham um papel relevante, a dissipação viscosa é de fato dominante

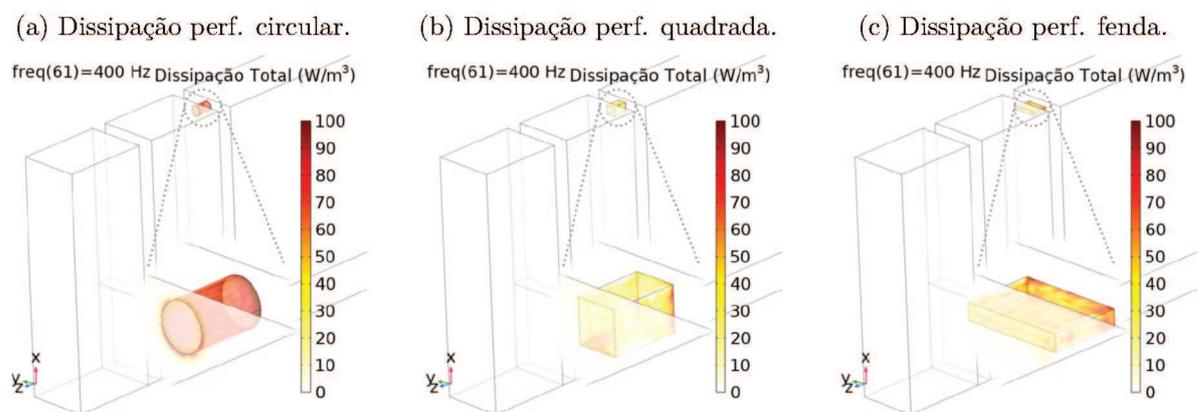
Figura 72 – Modelo numérico para a distribuição de pressão e velocidade na região próxima à perfuração.



Fonte: O autor.

e responsável pela maior parte da energia acústica consumida, especialmente em áreas estreitas e perfurações. No Apêndice D.3, é explorado em detalhes os efeitos térmicos e viscosos individualmente para essas amostras, reforçando a necessidade de uma análise abrangente da dissipação de energia para otimizar o desempenho dos metamateriais absorvedores de som.

Figura 73 – Dissipação total de energia no interior da cavidade de metamaterial acústico.



Fonte: O autor.

6.4 Banda larga

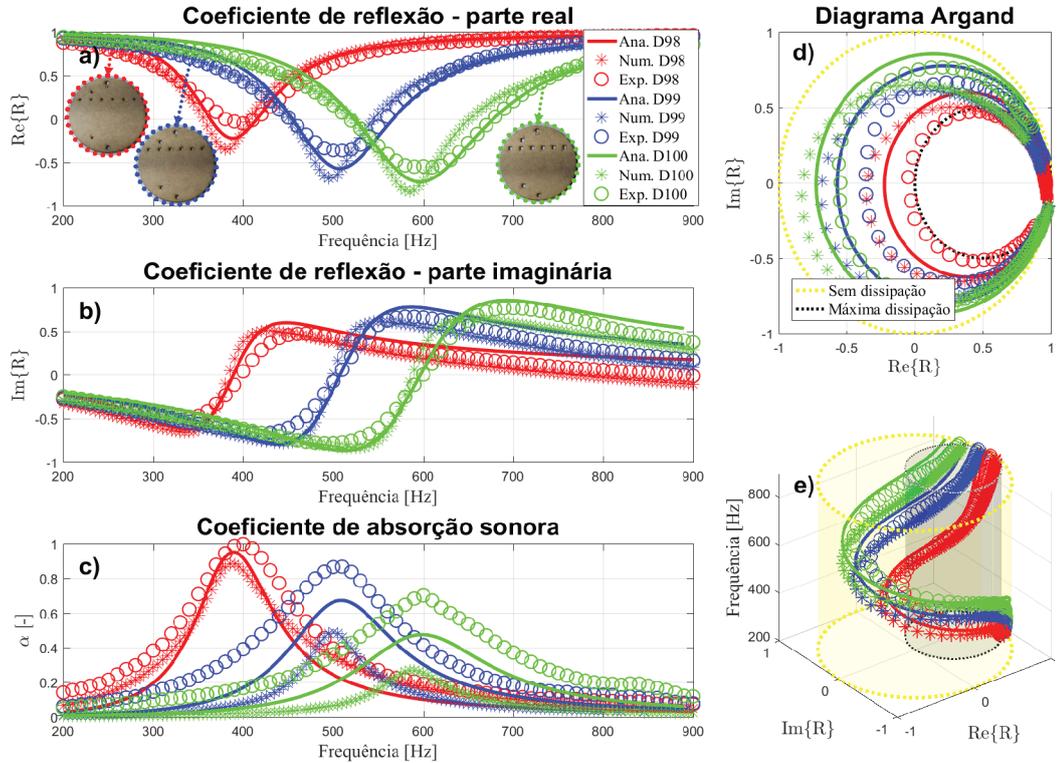
A ampliação da largura de banda de absorção sonora nos metamateriais acústicos é alcançável por meio da integração de células sintonizadas em diferentes frequências, conforme discutido anteriormente. Entretanto, é crucial observar um espaçamento adequado entre os picos de absorção sonora. Se isso não for considerando o efeito combinado não proporcionará um rendimento superior ao das amostras individuais. Esta abordagem é corroborada pelos estudos de Duan *et al.* (2021) e Fan *et al.* (2022), os quais enfatizam a possibilidade de aprimoramento da absorção acústica em banda larga através da conexão paralela de unidades com frequências de absorção distintas. A partir de um planejamento cuidadoso do espaçamento de frequência e a sintonização das unidades, é possível otimizar a capacidade dos metamateriais acústicos de absorver uma gama mais ampla de frequências sonoras.

Foram planejadas amostras com objetivo de apresentar absorção sonora em frequências entre 300 Hz e 600 Hz. No entanto, é importante destacar que essas amostras não foram projetadas com cavidades específicas para essa faixa de frequência. Por essa razão, o dimensionamento e otimização dessas amostras foram limitados aos parâmetros relacionados ao painel microperfurado.

Além disso, três amostras compostas pela mesma cavidade foram manufaturadas, cada uma contendo apenas um tipo de perfuração, denominadas: D98, D99 e D100. Isso possibilitou a comparação do comportamento individual com o desempenho combinado do uso de perfurações distintas na mesma amostra. Os parâmetros utilizados em cada amostra estão descritos nos Quadros 9 e 10. A Figura 74 apresenta os resultados obtidos por meio de modelos analíticos, numéricos e experimentais. Em complemento, a Tabela 7, sintetiza alguns resultados dos principais indicadores das curvas de absorção para os modelos. Como os parâmetros relacionados à cavidade foram mantidos constantes, cada conjunto de dimensões que compõe uma cavidade permite uma faixa de sintonia possível, de cerca de 200 Hz, característica já analisada na seção A.1 (Análise de sensibilidade). A variação de apenas uma dimensão (no caso, o parâmetro L_q) é suficiente para deslocar o pico de absorção, mas o valor máximo para cada situação é alterado. Os valores analíticos do coeficiente de absorção sonora (Figura 74 c e Tabela 7) foram de 0,95, 0,65 e 0,45 para as amostras D98, D99 e D100, respectivamente. O desempenho inferior da amostra sintonizada na frequência de 600 Hz, quando comparada com as demais, é devido ao coeficiente de reflexão (ver Figura 74a) ter superado o valor nulo, alcançando cerca de -0,5 para a curva experimental. Esta característica pode ser alterada ao reduzir o número de cavidades da amostra sintonizadas nesta frequência, movendo a curva do coeficiente de reflexão para valores próximos do zero, ou então reprojetoando a cavidade para dimensões otimizadas para a frequência de 600 Hz.

O estudo em banda larga foi realizado mediante a criação de uma amostra com três

Figura 74 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com dimensões das cavidades constantes. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



Fonte: O autor.

Tabela 7 – Síntese dos indicadores de desempenho das curvas para diferentes valores de perfuração.

Amostra	Freq. pico [Hz]	α pico	Largura de 50% [Hz]	Q_α
Ana. D98	390	0,95	104	0,76
Num. D98	390	0,88	115	0,70
Exp. D98	399	1,00	154	0,79
Ana. D99	506	0,67	88	0,61
Num. D99	500	0,49	-	-
Exp. D99	504	0,87	152	0,71
Ana. D100	598	0,47	-	-
Num. D100	590	0,27	-	-
Exp. D100	600	0,70	122	0,60
Ana. D106	520	0,99	276	0,70
Num. D106	382	1,00	272	0,57
Exp. D106	508	0,98	298	0,68

Fonte: O autor.

diferentes dimensões de suas perfurações, permitindo a presença de picos de absorção em três frequências distintas. As dimensões utilizadas para projeto e construção das amostras, bem como os detalhes dos modelos analítico e numérico, estão expressas no Quadro 11. A amostra planejada para atuar em banda larga é composta pela combinação de três

geometrias diferentes. Dado que essa amostra possui oito cavidades, foram utilizadas três, três e duas para as dimensões x_1 , x_2 e x_3 , respectivamente.

Quadro 11 – Parâmetros utilizados para dimensionamento dos painéis frontais com múltiplos picos de absorção.

Painel frontal						
Código	Material	Perfil	t	x_1	x_2	x_3
106	MDF	Multiperfuração	2,90	2,30	3,55	4,80

Fonte: O autor.

Os resultados apresentados pela Figura 75 mostram que a amostra D106 apresenta três picos de absorção sonora em frequências específicas, com valores experimentais de absorção de 0,81, 0,98 e 0,98 para as frequências de 400 Hz, 500 Hz e 600 Hz, respectivamente. Além disso, a largura de banda da amostra, medida pela faixa de frequência na qual a amostra possui coeficiente de absorção superior a 0,5, foi de 298 Hz.

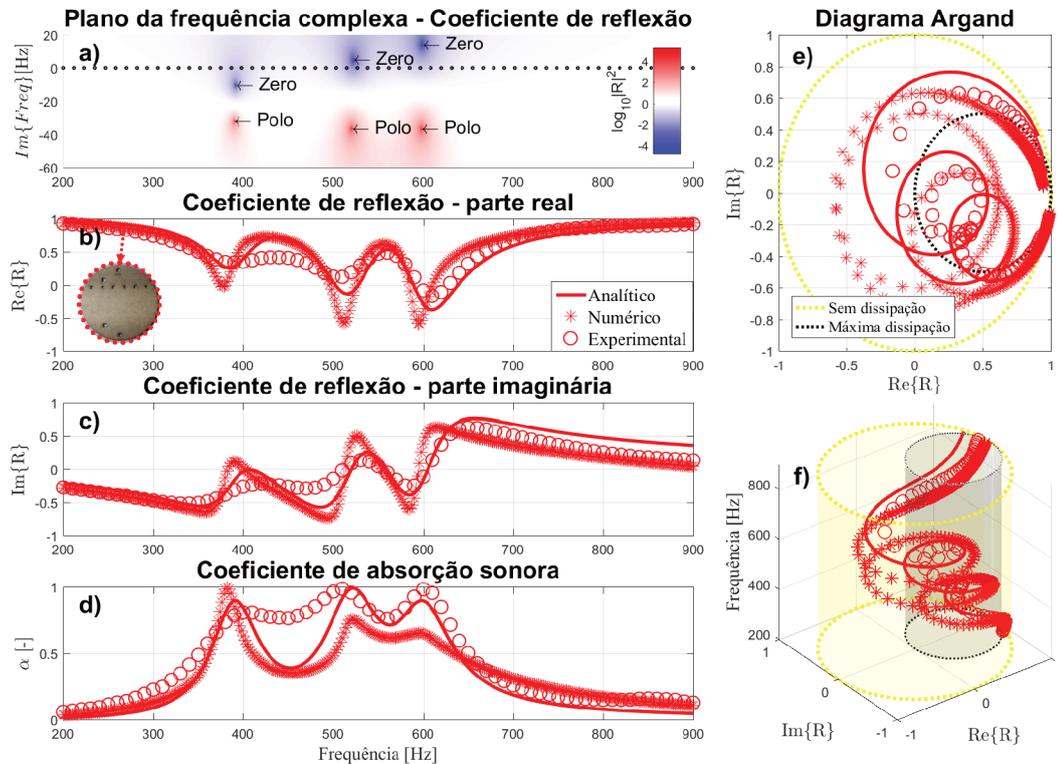
Ao analisar a Figura 75a, observa-se que o primeiro zero da absorção sonora, para a frequência de 400 Hz, ocorreu próximo ao eixo das abscissas, com valor negativo para a frequência imaginária. Isso sugere que a redução do aproveitamento da amostra pode diminuir o desempenho do material nessa frequência. Por outro lado, os zeros referentes aos demais picos de absorção, nas frequências de 500 Hz e 600 Hz, ocorreram para a frequência imaginária positiva, indicando ser possível aumentar o desempenho da absorção sonora da amostra com a redução do aproveitamento.

Além disso, a análise do diagrama Argand presente nas Figuras 75e e 75f mostra que em diversas frequências a amostra esteve próxima da região de máxima absorção sonora. Esse resultado sugere que o acoplamento de várias perfurações possibilita uma melhor distribuição da faixa de dissipação sonora, contribuindo para o aumento do desempenho do metamaterial.

Foram obtidos os resultados do modelo numérico para o campo de pressão, velocidade e dissipação termoacústica em três frequências diferentes nas quais ocorrem os picos de absorção da amostra (ver Figura 76). Inicialmente, as figuras a) e b) demonstram o comportamento da amostra para 400 Hz. É possível perceber que a maior velocidade ocorre na menor perfuração, indicando ser neste local onde principalmente ocorre a dissipação de energia para esta frequência. Este fato é reforçado pela figura c), que também analisa o interior das cavidades. Na primeira cavidade, há maior pressão em cerca de 20 Pa, decorrente do fenômeno de ressonância ocorrido na geometria, o que acaba resultando no maior bombeamento de fluido, aumento de velocidade das partículas na perfuração, com valores de 0,2 m/s e dissipação de energia.

As Figuras 76 d) e 76 e) mostram o comportamento para a frequência de 500 Hz, onde os maiores valores de pressão e velocidade, respectivamente na cavidade e perfuração, foram notados na segunda geometria, indicando a ocorrência de ressonância acústica nesta

Figura 75 – Comparativo dos resultados para a amostra D106. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.

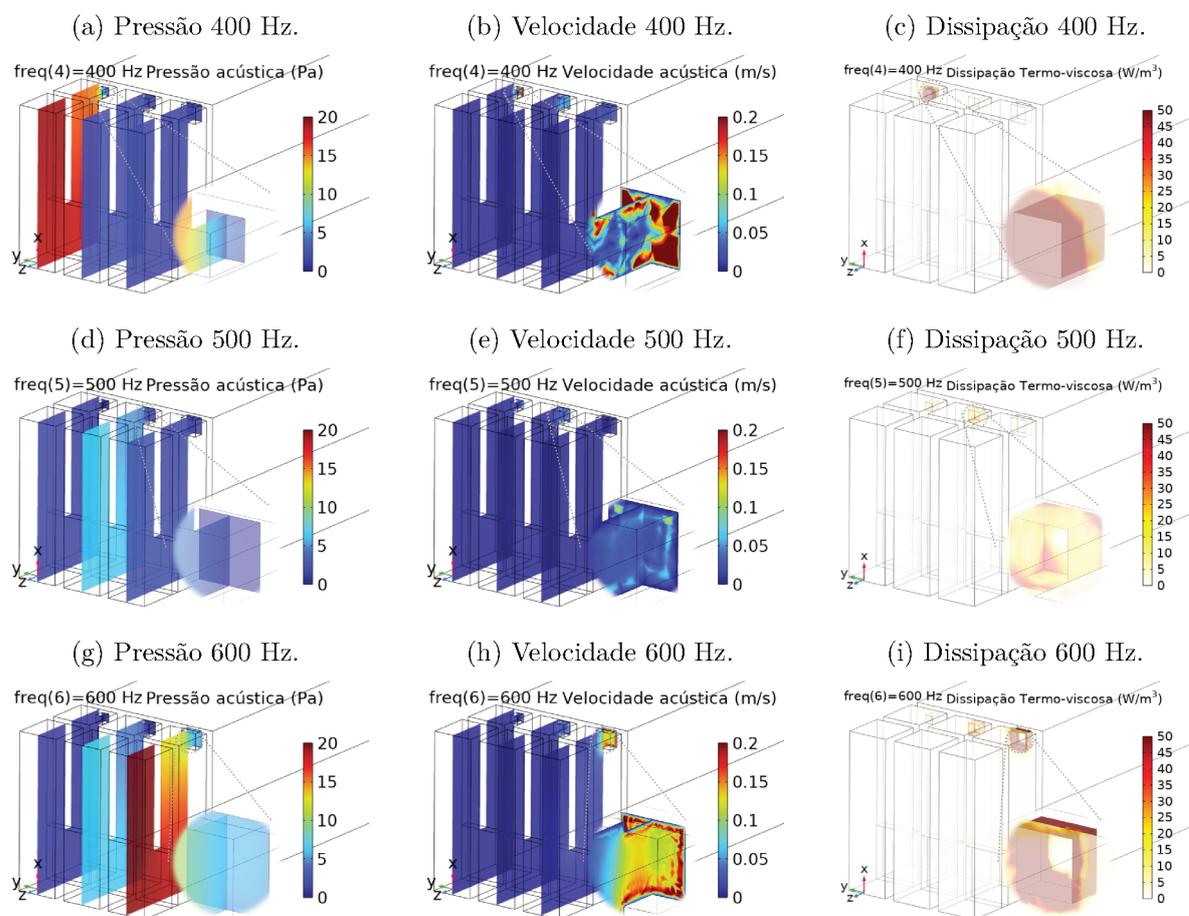


Fonte: O autor.

cavidade para a frequência analisada. Para 600 Hz, a Figura 76 h) demonstra que a maior velocidade na perfuração ocorre na perfuração com maior dimensão, como previsto pelo modelo analítico. Para esta frequência, também ocorre o maior valor de pressão na cavidade com a maior perfuração, indicando o casamento de impedâncias para a frequência analisada, além de ocorrer a maior região de dissipação termoacústica para esta perfuração. Por fim, é possível perceber que há uma cavidade e perfuração que são protagonistas na dissipação da energia para cada frequência analisada. No entanto, como existe uma proximidade entre as frequências de sintonia dessas amostras, existe a participação, em menor grau, das demais cavidades na dissipação, tornando a amostra mais eficaz em atuar em uma largura de frequência maior para absorção do som.

As Figuras 76 d) e 76 e) indicam que a segunda cavidade é a responsável pela absorção acústica na região da frequência de 500 Hz, sendo obtido valores de pressão no interior da cavidade em cerca de 8 Pa e velocidades na perfuração de 0,05 m/s, a Figura 76 f) demonstra que a dissipação, com valores máximos de $50 W/m^3$ ocorre na perfuração, principalmente na segunda, com contribuição complementar da perfuração menor (sintonizada para 400 Hz). Para 600 Hz, a Figura 76 h) demonstra que o pico de velocidade na perfuração ocorre na perfuração com maior dimensão, como previsto

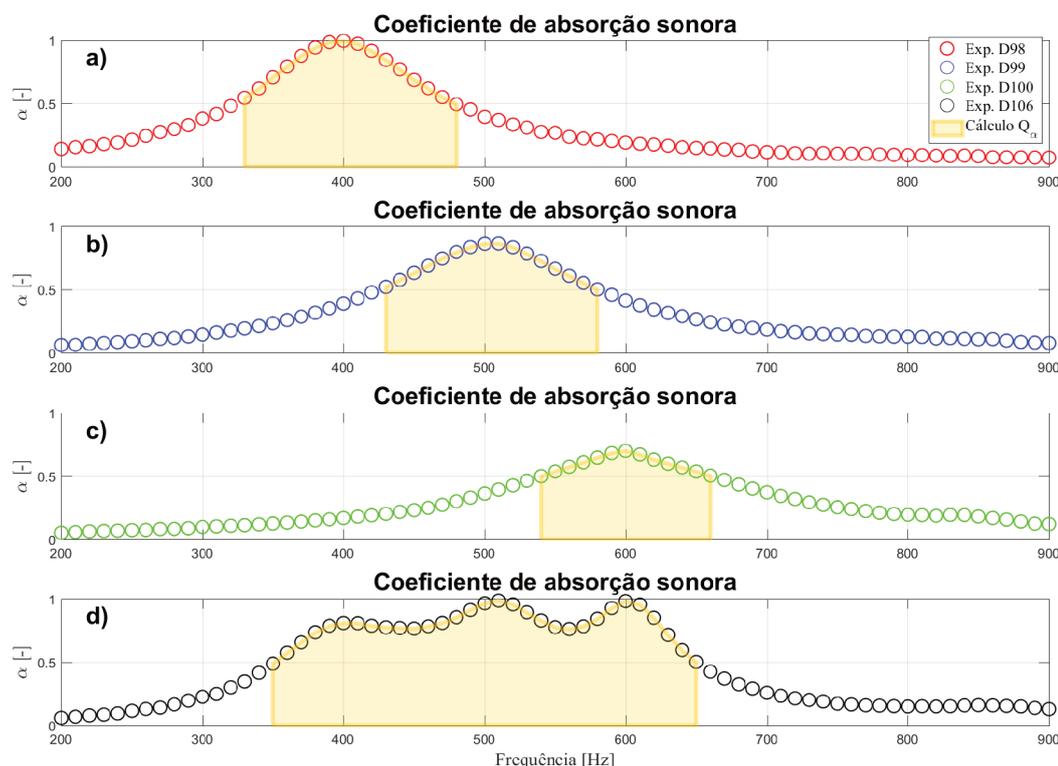
Figura 76 – Modelo numérico para a amostra D106 em diferentes frequências.



Fonte: O autor.

pelo modelo analítico. Para esta frequência, também ocorre o maior valor de pressão na cavidade com a maior perfuração, indicando o casamento de impedâncias para a frequência analisada, além de ocorrer a maior região de dissipação termoacústica para esta perfuração. Por fim, é possível perceber que há uma cavidade e perfuração que são protagonistas na dissipação da energia para cada frequência analisada. No entanto, como existe uma proximidade entre as frequências de sintonia dessas amostras, existe a participação, em menor grau, das demais cavidades na dissipação, tornando a amostra mais eficaz em atuar em uma largura de frequência maior para absorção do som.

O indicador Q_α , conforme explorado por Vergara *et al.* (2022), foi determinado para as amostras D98, D99, D100 e D106. Este processo teve como finalidade demonstrar a capacidade de absorção em uma faixa de frequência mais ampla ao combinar diferentes dimensões de perfuração na mesma amostra. A Figura 77 ilustra o critério adotado para tal cálculo, e os resultados encontram-se descritos na Tabela 7. Quando comparados apenas os dados experimentais das quatro amostras em estudo, a maior pontuação de Q_α (Absorção média na faixa de frequência analisada) foi alcançada pela amostra D98, seguida pelas amostras D99 e D100, com valores correspondentes de 0,79, 0,71 e 0,60,

Figura 77 – Determinação do indicador Q_α das amostras D98, D99, D100 e D106.

Fonte: O autor.

respectivamente. A amostra D106, por sua vez, apresentou um resultado intermediário de Q_α , com 0,68, mas exibiu uma largura de banda de absorção com α de 50% em 298 Hz, aproximadamente duas vezes maior do que as larguras das amostras com um único tamanho de perfuração. Portanto, a combinação de diferentes dimensões de perfuração mostra-se um método eficaz para melhorar o desempenho da amostra sem a necessidade de aumentar as dimensões dos materiais.

6.5 Vazamento da amostra

O emprego da técnica de corte a laser com camadas justapostas para manufatura de metamateriais acústicos requer a montagem das amostras a partir dos empilhamentos das camadas. Em comparação com a técnica de impressão 3D, a montagem das camadas por corte a laser torna o material mais suscetível ao vazamento acústico entre elas. Para minimizar este efeito, a técnica prevê a utilização de cola entre as camadas, de modo que, ao secar, forma-se um material rígido que preenche as microfrestas, inibindo o vazamento. Para avaliar a influência desse fenômeno na faixa de frequência de interesse, foram criadas três diferentes cavidades com características distintas quando à utilização de cola. As geometrias das cavidades estão descritas no Quadro 12, e o painel microperfurado utilizado no ensaio foi descrito no Quadro 10. A cavidade K foi construída utilizando impressão 3D,

formando uma única estrutura que não possibilita a existência de vazamentos no interior da cavidade. A cavidade E sendo construída seguindo a técnica padrão de montagem com uma película de cola branca entre cada camada de material. Por outro lado, a geometria J foi montada utilizando a técnica de corte a laser, porém sem a utilização de cola branca, de modo que a influência do vazamento deve ser percebida durante os ensaios.

Quadro 12 – Cavidades dimensionadas para avaliação da influência do vazamento entre as camadas da amostra.

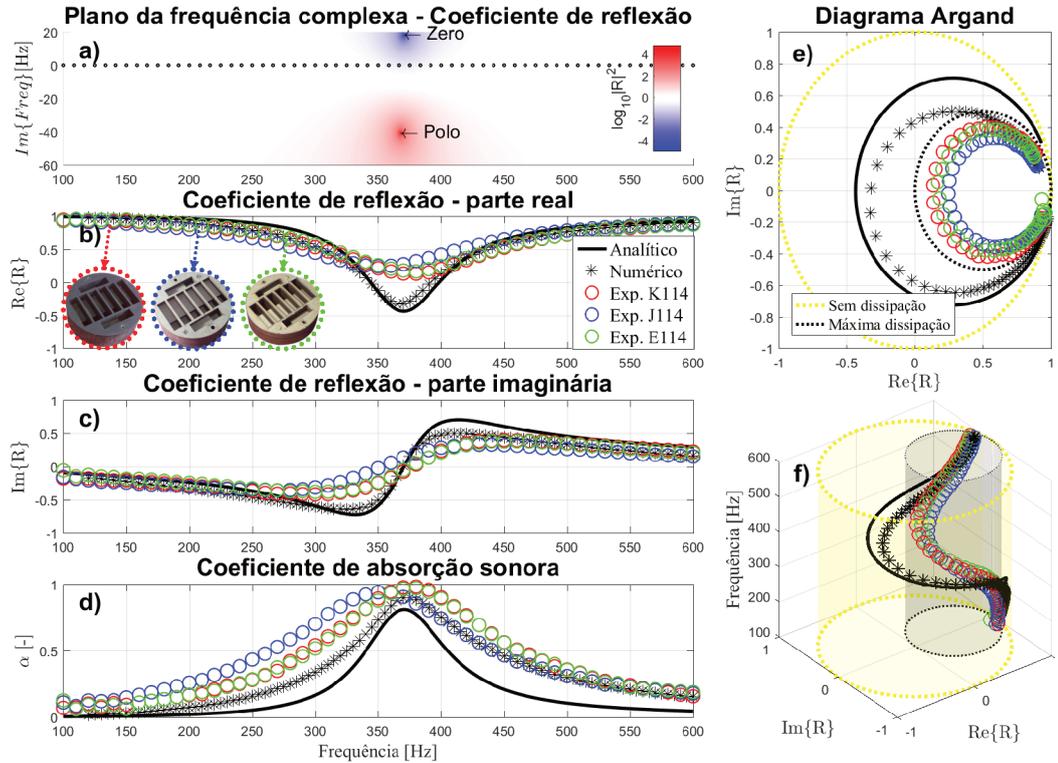
Cavidade							
Código	Condição	n	h (mm)	m (mm)	b_0	L (mm)	T (mm)
E	MDF com final de acrílico	2	32,2	15	2,9	49,1	3
J	MDF sem cola	2	32,5	15	2,9	49,1	3
K	Plástico impresso - ABS	2	32,3	15	2,9	49,1	3

Fonte: O autor.

Os resultados do desempenho das amostras foram avaliados e estão mostrados na Figura 78. Como as dimensões das amostras foram praticamente idênticas (ver Quadro 12), apenas duas curvas foram necessárias para representar os modelos analítico e numérico. O plano da frequência complexa para o coeficiente de reflexão indica que o pico de absorção da amostra planejada está em 370 Hz. O valor do "zero" próximo a 20 Hz no eixo da frequência imaginária indica que a amostra apresenta um coeficiente de reflexão acima do valor ideal. Esta situação foi mantida devido ao fator de aproveitamento das amostras construídas para o ensaio experimental. Dessa forma, o excesso do valor do coeficiente de reflexão é compensado pela menor área útil da amostra, resultando em um melhor desempenho experimental. A análise da Figura 78 d) demonstra que os resultados dos modelos analítico e numérico foram semelhantes, principalmente em relação à frequência em que ocorre o pico de absorção. Entretanto, os resultados experimentais apresentaram diferenças. A amostra K114 foi fabricada utilizando a tecnologia de impressão 3D, que possui maior controle quanto à existência de vazamentos, garantindo que no interior das cavidades não haja ocorrência desse fenômeno. O resultado experimental seguiu o valor previsto pelos modelos teórico e de simulação. Da mesma forma, o resultado experimental da amostra E114, construída pela técnica de corte a laser com as camadas coladas, apresentou semelhança com os valores coletados pela amostra fabricada com impressão 3D. Isso indica que, caso haja ocorrência de vazamentos no interior das cavidades, o fenômeno não foi suficiente para alterar o comportamento acústico na frequência de análise, pelo menos para o número de enrolamento analisado ($n=2$).

Os índices de qualidade das curvas analisadas estão expostos na Tabela 8. Para essas amostras, esperava-se que a frequência de pico se aproximasse de 375 Hz. Essa expectativa foi confirmada para todas as amostras, exceto para a J114, que alcançou 351 Hz, um desvio de aproximadamente 25 Hz em relação ao objetivo estabelecido. Vale ressaltar que a amostra J114 foi montada sem a aplicação de cola branca entre as camadas, e o propósito era avaliar os efeitos dessa ausência no espectro de absorção sonora. Embora,

Figura 78 – Comparativo dos resultados de amostras com diferentes vedações das cavidades. a) Plano de frequência complexa. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. c) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. d) Absorção sonora. e) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. f) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



Fonte: O autor.

Tabela 8 – Síntese dos indicadores de desempenho das curvas para diferentes valores de vedação.

Amostra	Freq. pico [Hz]	α pico	Largura de 50% [Hz]
Analítico	371	0,81	65
Numérico	375	0,90	115
Exp. K114	376	0,99	165
Exp. J114	351	0,94	178
Exp. E114	375	0,97	162

Fonte: O autor.

a frequência de pico obtida não tenha atingido o valor alvo, a amostra J114 cumpriu com o objetivo proposto. No que diz respeito ao pico de absorção, os resultados se mostraram bastante similares entre todas as amostras analisadas.

Com base nos resultados da avaliação das amostras, foi identificada uma diferença na amostra J114, que foi projetada para facilitar a ocorrência de vazamentos. O desempenho acústico dessa amostra foi inferior em relação às outras amostras, apresentando um pico de absorção sonora cerca de 5% menor e uma frequência de sintonia cerca de 20 Hz abaixo das demais amostras. Uma possível explicação para essa diferença está relacionada ao espaço

vazio de aproximadamente 0,5 mm entre a face externa da amostra e o porta-amostra do tubo de impedância. Ao posicionar a amostra nessa estrutura e vedar a fresta com massa de calafetar, pode ocorrer vazamento entre a cavidade da amostra, gerando uma cavidade extra que circula toda a amostra e aumentando ligeiramente o volume interno do metamaterial. Esse aumento de volume pode ter reduzido a frequência de ressonância, justificando a diferença observada. Para confirmar essa hipótese, são sugeridos novos experimentos.

6.6 Análise de sensibilidade

A validação experimental da análise de sensibilidade apresentada na Seção A.1 foi realizada em amostras de metamaterial com $n=2$ enrolamentos e perfuração fenda. A variável estudada foi a menor dimensão da perfuração fenda (d_f). Foram construídas sete amostras, onde o parâmetro analisado variou entre 0,3 mm e 1,6 mm. As dimensões das amostras construídas estão apresentadas nos Quadros 9 e 10.

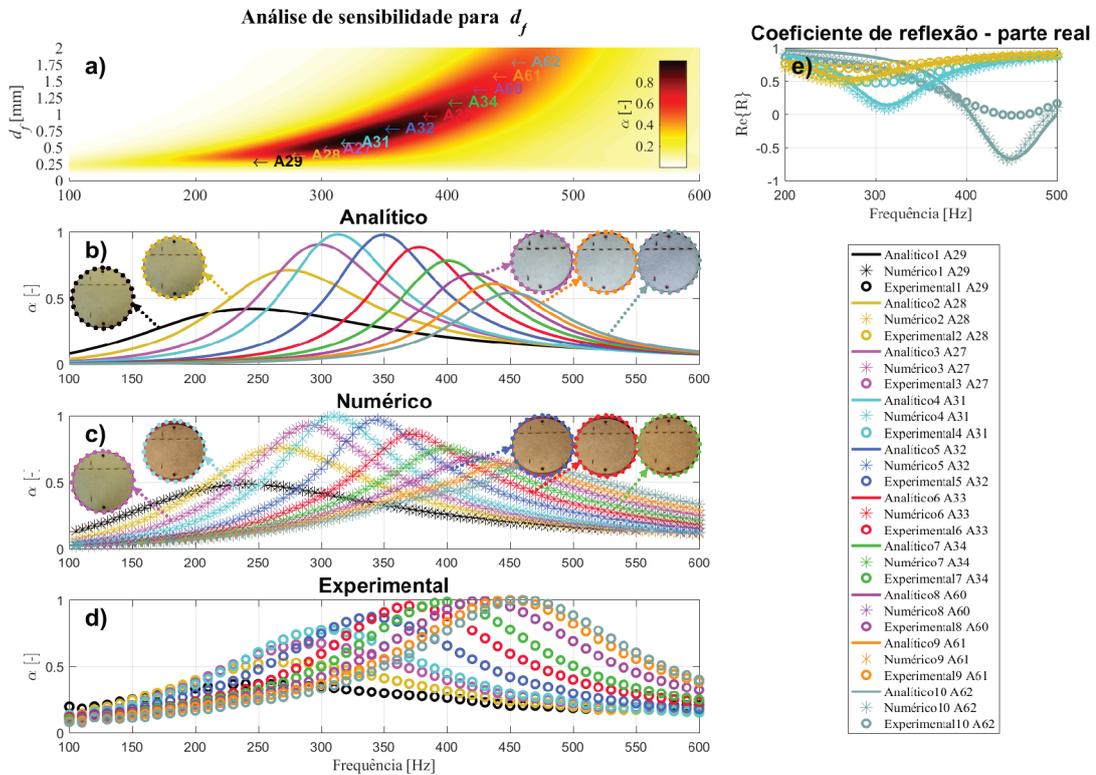
A Figura 79 apresenta os resultados da análise de sensibilidade para a variável d_f . Na Figura 79 a), é exibido o plano com o resultado para o modelo analítico, onde as cores indicam o valor do coeficiente de absorção sonora. Além disso, foram adicionados os valores pico de absorção obtidos para os dados experimentais, representados por meio das cores e códigos que indicam a cavidade e o painel frontal microperfurado utilizados para formar a amostra.

As Figuras 79 b), c) e d) demonstram, respectivamente, os resultados para os modelos analíticos, numéricos e experimentais. Com relação à frequência em que ocorre o pico de absorção, os resultados para todos os modelos, para cada amostra, obtiveram correspondência, com diferenças inferiores a 2 Hz. Para os modelos analíticos (ver figura b), a quarta amostra (A31) obteve o maior valor de absorção, assim como indicado pela análise de sensibilidade (ver figura a). Entretanto, para os resultados experimentais, é percebido um aumento da frequência ao longo das amostras, com valor máximo ocorrido para a décima amostra (A62). Os resultados obtidos para os modelos numéricos (ver figura c) indicam o mesmo comportamento.

As diferenças entre os picos de absorção para os modelos analíticos e numéricos, comparado com os valores experimentais, podem ser justificadas ao analisar o gráfico da parte real do coeficiente de reflexão (ver figura e). Devido ao menor fator de aproveitamento da amostra construída, como discutido no Capítulo 4.3, existe uma redução do desempenho da amostra para geometrias com coeficiente de reflexão com valores negativos. O menor aproveitamento faz com que o valor experimental se aproxime de zero, e, deste modo, o cálculo da absorção sonora resulta em valores mais elevados.

A amostra A28, como demonstrado na figura e), apresentou os valores da parte

Figura 79 – Comparativo dos resultados de amostras com perfuração fenda, com parâmetro d_f variável. a) Análise de sensibilidade para a amostra A. b) Absorção sonora analítico. c) Absorção sonora numérico. d) Absorção sonora experimental. e) Coeficiente de reflexão parte real para as amostras A28, A31 e A62.



Fonte: O autor.

real do coeficiente de reflexão de 0,5 e 0,7 para os resultados analítico e experimental, respectivamente. A amostra A31 apresentou valores de 0,1 e 0,5 para os resultados teórico e experimental. Na sequência, a amostra A62 apresentou valores de -0,7 e 0. O coeficiente de absorção é determinado pela Equação 2.7 e depende do valor elevado na segunda potência do coeficiente de reflexão. Valores do coeficiente de reflexão próximos de zero resultam em α perto do valor unitário. Assim, a redução do coeficiente de reflexão sonora das amostras experimentais, devido o fator de aproveitamento, para os casos com coeficiente de reflexão negativo, resulta em maiores valores de α .

6.7 Viabilidade financeira da técnica

A viabilidade financeira do método de fabricação de metamateriais acústicos proposto neste trabalho, com a técnica de corte a laser e camadas justapostas, foi comparado com duas tecnologias de impressão 3D, que são frequentemente utilizadas para fabricação de metamateriais. A Tabela 9 especifica os tempos para fabricação e montagem, além do custo médio para cada elemento. A técnica de corte a laser com camada justaposta foi idealizada para permitir a alteração do painel frontal microperfurado da amostra,

possibilitando a geração de novas amostras com comportamentos distintos ao fabricar novos painéis microperfurados.

Tabela 9 – Comparativo de custos para produção de amostras de metamateriais circulares com diâmetro de 107 mm.

Peça	Material	Tecnologia	Tempo fabricação [min]	Tempo montagem [min]	Custo médio [R\$]
Cavidade	MDF	Corte laser	7	60	50,00
Tampa	MDF	Corte laser	1	-	1,50
Cavidade	Acrílico	Corte laser	7	60	80,00
Tampa	Acrílico	Corte laser	1	-	3,80
Completa	ABS	Impressão 3D FDM	960	-	221,00
Completa	ABS	Impressão 3D LCD	780	-	307,00

Fonte: O autor.

A produção de uma amostra utilizando a técnica de impressão 3D mais barata custa cerca de R\$221,00, custo superior aos R\$51,50 (23,3% do valor para impressão 3D) e R\$83,80 (38% do valor para impressão 3D) para produzir, respectivamente, em MDF e acrílico. Entretanto, a utilização do corte a laser exige que as camadas cortadas que formam as cavidades sejam montadas para formar a peça, trabalho que exige cerca de 60 minutos e que não é necessário para a tecnologia de impressão 3D. Deste modo, para a produção de apenas uma amostra, esse trabalho adicional pode ter um grande peso e desfavorecer a utilização da técnica de corte a laser. Contudo, com o aumento do número de amostras com as mesmas cavidades, como os ensaios com variação das perfurações, o esforço exigido para montagem das amostras é diluído, tornando-se quase irrelevante.

A fabricação de amostras com maiores áreas superficiais aumenta as vantagens do método de corte a laser, visto que as diferenças entre os custos de produção para os métodos aumentam, assim como o tempo de fabricação. Entretanto, o tempo de montagem para as amostras produzidas pela técnica do corte a laser não aumenta na mesma proporção, visto que o tempo do processo tem maior dependência com o número de camadas a ser alinhadas e coladas e menor relação com a área superficial de cada camada. Neste sentido, a Tabela 10 demonstra a estimativa para produção de amostras de metamaterial quadrado, com dimensões de 160 mm x 160 mm (ver Figura 80).

Tabela 10 – Comparativo de custos para produção de amostras de metamateriais quadrados com dimensão de 160 mm x 160 mm.

Peça	Material	Tecnologia	Tempo fabricação [min]	Tempo montagem [min]	Custo médio [R\$]
Cavidade	MDF	Corte laser	20	80	110,00
Tampa	MDF	Corte laser	1	-	3,80
Cavidade	Acrílico	Corte laser	20	80	185,00
Tampa	Acrílico	Corte laser	1	-	10,00
Completa	ABS	Impressão 3D FDM	2.940	-	682,00
Completa	ABS	Impressão 3D LCD	1.500	-	607,00

Fonte: O autor.

Figura 80 – Amostra de metamaterial retangular 160 mm x 160 mm.

(a) Montagem das camadas com parafusos.

(b) Cavidades montadas.

(c) Amostra completa.



Fonte: O autor.

Nesse sentido, a técnica de corte a laser mostra-se vantajosa para produzir amostras em que seja possível alterar o painel frontal microperfurado, reaproveitando a estrutura das cavidades. Além disso, o corte a laser pode viabilizar a manufatura de metamateriais com grandes dimensões e área superficial suficiente para ensaios em campo difuso, o que pode ser impraticável com a impressão 3D, devido a limitações financeiras e de tempo de fabricação.

6.8 Ensaios experimentais realizados

O Quadro 13 sintetiza todas as amostras utilizadas durante o desenvolvimento da pesquisa, que foi composta por 14 grupos de avaliação. Dentre eles, destaca-se o ensaio ABS e os ensaios 1 e 2, que permitiram ajustes iniciais dos modelos utilizados. Além deles, o ensaio 3 teve papel fundamental no ajuste do modelo analítico do metamaterial do tipo fenda, que apresentou maior correspondência entre os valores planejados e os resultados experimentais. Por outro lado, o ensaio 4 possibilitou a validação da técnica utilizada para um modelo distinto de metamaterial. O ensaio 5 permitiu a verificação do comportamento dos modelos analíticos e numéricos para amostras projetadas com frequência de sintonia distante do valor máximo para a amostra. Já os ensaios 6 e 8 avaliaram o desempenho do metamaterial para atuar com largura estendida da frequência de absorção sonora, sendo que o ensaio 8 permitiu a comparação do desempenho das amostras devido às mudanças de material. Na sequência, o ensaio 9 validou a hipótese da utilização do fator de aproveitamento para corrigir as limitações impostas pela seção circular do tubo de impedância. A verificação dos efeitos resultantes dos modelos com diferentes enrolamentos e avaliou a influência da matéria-prima na absorção sonora foi possível ser realizada com o ensaio 11. O Capítulo 5 foi construído a partir dos dados coletados no ensaio CEP, nele cinco conjuntos de amostras foram avaliadas, totalizando 75 experimentos. Por fim, o ensaio 12 foi planejado para demonstrar com clareza alguns dos

efeitos encontrados ao longo da pesquisa, utilizando amostras específicas.

Quadro 13 – Síntese dos ensaios com tubo de impedância realizados.

Ensaio	Nº Amostras	Principal objetivo
1	8	Verificar a viabilidade da técnica para manufatura de MMA
2	13	Analisar e corrigir diferenças nos resultados ocasionados por imperfeições na fabricação
3	9	Verificar o modelo analítico e numérico para perfuração fenda
4	2	Testar MMA do tipo cavidade paralela
5	16	Entender os resultados para projetos fora da frequência com maior absorção
6	6	Investigar a viabilidade da manufatura de amostras com múltiplas frequências pico de absorção
7	30	Avaliar cavidade em acrílico
8	33	Amostras para absorção em banda larga (múltiplas perfurações)
9	9	Investigar o efeito experimental do aproveitamento da amostra
10	8	Avaliar a absorção das cavidades sem o painel perfurado frontal
11	48	Investigar diferentes enrolamentos (n=3 e n=4) para MDF e acrílico
12	51	Avaliar diversas amostras para comparação e discussão dos resultados
CEP	75	Controle Estatístico de Processos
ABS	8	Estimar a absorção sonora dos utilizados para fabricação de MMA
TOTAL	316	-

Fonte: O autor.

7 Considerações Finais

Foi possível construir amostras de metamateriais acústicos utilizando diferentes materiais e, por meio de ensaios experimentais, comparar o desempenho de cada uma delas. Observou-se que houve pouca diferença entre os resultados obtidos para as amostras fabricadas em MDF e acrílico, obtendo-se resultados experimentais com pico em 100% de absorção para a frequência de 370 Hz, o que indica que ambas as opções são viáveis para a produção de metamateriais com a técnica do corte a laser. No entanto, é importante ressaltar que há possíveis diferenças em relação a fatores como a durabilidade e resistência mecânica, que devem ser considerados na escolha do material a ser utilizado. Além disso, outras opções de materiais podem ser exploradas, visando uma maior otimização do desempenho dos metamateriais.

As amostras avaliadas tiveram como alvo frequências na região dos 300 Hz devido às limitações do tubo de impedância. Além disso, para a obtenção de novas amostras muitas cavidades foram reaproveitadas e como existem limitações na faixa de atuação destes elementos, as dimensões das cavidades foram mantidas constantes e apenas os valores das perfurações foram variados, assim a mudança da frequência de atuação da amostra resultou na diminuição do pico de absorção sonora. Para conseguir máxima atuação em uma ampla faixa de frequência é necessário modificar as características dos dois elementos, cavidade e painel perfurado. Deste modo, foi mantida para o estudo da absorção sonora a faixa de frequências entre 300 Hz e 600 Hz.

Todas as situações estudadas permitem a aplicação de três abordagens diferentes. Mediante os modelos numéricos é mais fácil ajustar os parâmetros e examinar o comportamento do material. Além disso, é possível criar um plano de frequência complexa e um diagrama Argand, que são elementos importantes para avaliar se as amostras estão corretamente dimensionadas. Posteriormente, os modelos numéricos foram usados principalmente para determinar a absorção sonora. No entanto, também é possível avaliar outras grandezas acústicas como o campo de pressão ou a velocidade de partículas no interior da geometria construída virtualmente, bem como identificar as regiões com maior dissipação. Em seguida, as amostras foram fabricadas e submetidas a testes de absorção sonora, utilizando um aparato de tubo de impedância com seção transversal circular. Esses resultados foram comparados com os resultados dos modelos analíticos e numéricos, resultando em maior confiabilidade e robustez dos dados obtidos.

A partir dos modelos estudados e validados experimentalmente, foram criadas amostras com objetivos específicos como desafios para a técnica estudada. Uma dessas amostras foi construída para comparar diferentes perfurações na tampa, sintonizadas na

mesma frequência, grande semelhança entre os resultados foi percebido indicando que todas as perfurações estudadas possuem desempenho satisfatório para a frequência pico de 300 Hz. Outra amostra foi desenvolvida com múltiplas frequências de sintonia, capaz de atuar com alta eficiência em baixas frequências e em uma largura de banda maior, foi obtido valores de absorção sonora acima de 80% para a faixa entre 380 Hz e 620 Hz. Essas amostras foram importantes para avaliar o desempenho da técnica em diferentes cenários e com diferentes especificações, contribuindo para uma maior compreensão da aplicação dos metamateriais na absorção sonora.

Utilizando a técnica de controle estatístico de processos, foram produzidas 15 amostras e avaliadas 5 vezes cada, totalizando 75 dados experimentais. O processamento desses dados mostrou que a principal fonte de erro não estava no processo de manufatura das amostras, mas sim na configuração inicial dos equipamentos do ensaio de tubo de impedância. Assim, foi possível demonstrar que, quando configurado corretamente, é possível garantir uma margem de tolerância de 10 Hz e uma taxa de erro de apenas 2 peças a cada bilhão de amostras ensaiadas. Esses resultados indicam a efetividade do controle estatístico de processos como uma ferramenta para a garantia da qualidade na produção de amostras com propriedades acústicas controladas.

No decorrer da pesquisa, foram projetadas e ensaiadas 316 amostras por meio do aparato de tubo de impedância. Desse total, 8 foram criadas para avaliar o desempenho da matéria-prima, enquanto outras 75 foram desenvolvidas para avaliações estatísticas. Grande parte dos resultados experimentais foi utilizada para aprimorar os modelos teóricos e identificar eventuais imperfeições no modelo numérico. No entanto, todos os dados foram processados e validados por meio dos modelos teóricos, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

A viabilidade financeira da construção de metamateriais absorvedores acústicos utilizando a técnica de corte a laser com camadas justapostas foi comprovada por meio de comparações diretas com os custos de produção utilizando outras técnicas, como a impressão 3D. Para amostras circulares com diâmetro de 107 mm, o gasto é cerca de 23,3% menor quando comparado com a construção de uma amostra em impressão 3D. Quando projetadas amostras com mesma cavidade, a economia pode ser ainda maior. Também foi analisado o custo de construção de amostras maiores, com secção transversal quadrada com lado de 160 mm. Para estas amostras, o gasto por amostra utilizando a técnica proposta é cerca de 16,7% do valor quando comparado com a impressão 3D-FDM. No entanto, além dos custos, o tempo de fabricação mostra-se bastante distinto. Contabilizando o tempo de fabricação e montagem, para amostras quadradas com lado de 160 mm, o tempo necessário para manufatura com o corte a laser é de apenas 3,4% do tempo requerido para a construção com impressão 3D.

Por fim, a comparação direta entre as técnicas demonstrou que o desempenho

das amostras construídas utilizando corte a laser é pelo menos semelhante às demais técnicas. Além disso, a construção por camadas cortadas no laser resulta em facilidade de construção de discontinuidades no interior das geometrias, possibilitando maior qualidade da manufatura de ângulos retos das cavidades. Como resultado, as amostras fabricadas possuem maior correspondência com os modelos teóricos e numéricos, reduzindo as incertezas do processo produtivo. Ainda, a possibilidade de alterar o painel frontal para agregar novas características à amostra mostrou-se um diferencial considerável para novos projetos, sobretudo para amostras com grandes dimensões, onde o custo é muito relevante.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos itens estudados no decorrer da pesquisa, algumas dúvidas surgiram, nas quais poderiam inspirar novos trabalhos, sendo destacados a seguir:

- Construir e avaliar o desempenho de amostras com maior fator de aproveitamento, utilizando um aparato do tubo de impedância com seção transversal quadrada, podendo com isso projetar e construir absorvedores com largura de banda ampliada em baixa frequência;
- Investigar experimentalmente a influência de um absorvedor poroso no interior da cavidade de metamaterial acústico, e criar um modelo teórico que considere os efeitos deste elemento no comportamento da amostra;
- Melhorar as variações originadas pelo sistema de medição, por meio de procedimentos padrões para os ensaios utilizando o tubo de impedância, visitar as amostras utilizadas para os ensaios de CEP com equipamentos menos variáveis;
- Construir metamateriais absorvedores acústicos com a técnica de corte a laser e camadas justapostas utilizando materiais metálicos como matéria-prima e avaliar se o desempenho das amostras é semelhante aos valores obtidos com MDF ou Acrílico;
- Projetar e fabricar amostras de metamaterial acústico com grandes dimensões e verificar se o desempenho sob campo sonoro difuso é semelhante ao campo sonoro direto.

Referências

- ALLARD, J.; ATALLA, N. *Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials 2e*. London: John Wiley & Sons, 2009.
- ALMEIDA, G. d. N. *Análise de um metamaterial acústico do tipo labiríntico na absorção sonora de baixas frequências*. 190 p. Dissertação (Mestrado) — Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- ALMEIDA, G. do N.; VERGARA, E. F.; BARBOSA, L. R.; LENZI, A.; BIRCH, R. S. Sound absorption metasurface with symmetrical coiled spaces and micro slit of variable depth. *Applied Acoustics*, v. 183, p. 108312, 2021. ISSN 0003-682X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X21004060>>.
- ANG, L. Y. L.; KOH, Y. K.; LEE, H. P. Plate-type acoustic metamaterials: Evaluation of a large-scale design adopting modularity for customizable acoustical performance. *Applied Acoustics*, v. 149, p. 156–170, 2019. ISSN 0003-682X.
- BARRON, M. *Auditorium acoustics and architectural design*. New York: Spon Press, 2009.
- BECK, A. B. *Ressonador de helmholtz do tipo labiríntico para controle da perda de transmissão sonora*. 2022. Universidade Federal de Santa Catarina. 75 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2022.
- BEHNIA, A.; CHAI, H. K.; MOUSA, A. A.; RAVANFAR, S. A. A novel damage index for online monitoring of rc slabs under monotonic loading by integration of process controlling into acoustic emission technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 119, p. 547–560, 2019. ISSN 0888-3270. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327018306502>>.
- BIES, D. A.; HANSEN, C. H.; HOWARD, C. Q. *Engineering noise control*. London: CRC press, 2017.
- CANNING, J. Fibre lasers and related technologies. *Optics and lasers in engineering*, Elsevier, v. 44, n. 7, p. 647–676, 2006.
- CAO, J.; WONG, Y. S.; LEE, K. S. Application of statistical process control in injection mould manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Taylor & Francis, v. 20, n. 5, p. 436–451, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09511920601160148>>.
- CAPOLINO, F. *Theory and phenomena of metamaterials*. Boca Raton: CRC press, 2009.
- CARISTAN, C. L. *Laser cutting guide for manufacturing*. [S.l.]: Society of manufacturing engineers, 2004.
- CASSETTARI, I.; VERGARA, E. F.; ALMEIDA, G. N.; BARBOSA, L. R.; MIKULSKI, R.; FARIAS, L. C. B. Desempenho de um metamaterial absorvedor acústico com diferentes perfurações manufaturado pela técnica de corte a laser e camadas justapostas. *Congresso Iberoamericano de Acústica, FIA 2020/22*, 2022.

- CHEN, J.-S.; CHEN, Y.-B.; CHENG, Y.-H.; CHOU, L.-C. A sound absorption panel containing coiled helmholtz resonators. *Physics Letters A*, v. 384, n. 35, p. 126887, 2020. ISSN 0375-9601. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375960120307544>>.
- CHEN, S.; FAN, Y.; YANG, F.; JIN, Y.; FU, Q.; ZHENG, J.; ZHANG, F. Engineering coiling-up space metasurfaces for broadband low-frequency acoustic absorption. *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters*, v. 13, n. 12, p. 1900426, 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pssr.201900426>>.
- COBO, P. Modelling of microperforated panel absorbers with circular and slit hole geometries. In: MULTIDISCIPLINARY DIGITAL PUBLISHING INSTITUTE. *Acoustics*. [S.l.], 2021. v. 3, n. 4, p. 665–678.
- COBO, P.; SIMÓN, F. Multiple-layer microperforated panels as sound absorbers in buildings: A review. *Buildings*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 2, p. 53, 2019.
- COMSOL. Acoustics module user guide version 6.0. *User's manual*, 2021.
- COOK, R. D. *et al. Concepts and applications of finite element analysis*. [S.l.]: John wiley & sons, 2007.
- COX, T.; D'ANTONIO, P. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. London: Crc Press, 2016.
- CRANDALL, I. B. *Theory of vibrating systems and sound*. New York: D. Van Nostrand Company, 1926.
- CRASTER, R. V.; GUENNEAU, S. *Acoustic metamaterials: Negative refraction, imaging, lensing and cloaking*. London: Springer Science & Business Media, 2012. v. 166.
- CUI, T. J.; SMITH, D. R.; LIU, R. *Metamaterials*. London: Springer, 2010.
- DEYMIER, P. A. *Acoustic metamaterials and phononic crystals*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. v. 173.
- DIEST, K. *Numerical methods for metamaterial design*. London: Springer, 2013. v. 127.
- DIVLIANSKY, I. *Advances in High-Power Fiber and Diode Laser Engineering*. [S.l.]: Institution of Engineering and Technology, 2019. (Materials, Circuits and Devices). ISBN 9781785617515.
- DONDA, K.; ZHU, Y.; FAN, S.-W.; CAO, L.; LI, Y.; ASSOUAR, B. Extreme low-frequency ultrathin acoustic absorbing metasurface. *Applied Physics Letters*, AIP Publishing LLC, v. 115, n. 17, p. 173506, 2019.
- DUAN, M.; YU, C.; XIN, F.; LU, T. J. Tunable underwater acoustic metamaterials via quasi-Helmholtz resonance: From low-frequency to ultra-broadband. *Applied Physics Letters*, v. 118, n. 7, p. 071904, 02 2021. ISSN 0003-6951. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/5.0028135>>.
- ENGHETA, N.; ZIOLKOWSKI, R. W. *Metamaterials: physics and engineering explorations*. Piscataway: John Wiley & Sons, 2006.

- ESFAHLANI, S.; HUSSEIN, S. *Electromagnetic Inspired Acoustic Metamaterials: Studying the Applications of Sound-Metastructures Interactions Based on Different Wave Phenomena*. 191 p. Tese (Doutorado) — FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Suisse, 2017.
- EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. *Master handbook of acoustics*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2022.
- FAN, J.; ZHANG, L.; WANG, X.; ZHANG, Z.; WEI, S.; SONG, B.; ZHAO, A.; XIANG, X.; ZHU, X.; SHI, Y. 3d printed ultra-thin acoustic metamaterials with adaptable low-frequency absorption performance. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, v. 1, n. 3, p. 100036, 2022. ISSN 2772-6657. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772665722000198>>.
- FANG, N.; XI, D.; XU, J.; AMBATI, M.; SRITURAVANICH, W.; SUN, C.; ZHANG, X. Ultrasonic metamaterials with negative modulus. *Nature materials*, Nature Publishing Group, v. 5, n. 6, p. 452–456, 2006.
- FARIAS, L. C. B. *Metamaterial acústico baseado em painéis micro perfurados de camada dupla para absorção em baixas frequências*. 120 p. Dissertação (Mestrado) — Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.
- GAN, W. S. *New acoustics based on metamaterials*. Singapore: Springer, 2018.
- GERGES, S. N. Y. *Ruído: fundamentos e controle*. Florianópolis: [s.n.], 2000. 696 p.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B.; KHORASANI, M.; ROSEN, D.; STUCKER, B.; KHORASANI, M. *Additive manufacturing technologies*. New York: Springer, 2021. v. 17.
- GODINA, R.; PIMENTEL, C.; SILVA, F.; MATIAS, J. C. Improvement of the statistical process control certainty in an automotive manufacturing unit. *Procedia Manufacturing*, v. 17, p. 729–736, 2018. ISSN 2351-9789. 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14, 2018, Columbus, OH, USAGlobal Integration of Intelligent Manufacturing and Smart Industry for Good of Humanity. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918312411>>.
- GODINA, R.; RODRIGUES, E. M.; MATIAS, J. C. An alternative test of normality for improving spc in a portuguese automotive sme. In: *Closing the Gap Between Practice and Research in Industrial Engineering*. [S.l.]: Springer, 2018. p. 277–285.
- GOUVEIA, M. A. d. C. *Controle estatístico da qualidade*. Londrina: Educacional, 2018.
- GUO, C.; SINGH, S. C. *Handbook of Laser Technology and Applications: Volume 1: Principles*. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- GUO, J.; ZHANG, X.; FANG, Y.; JIANG, Z. A compact low-frequency sound-absorbing metasurface constructed by resonator with embedded spiral neck. *Applied Physics Letters*, v. 117, n. 22, p. 221902, 11 2020. ISSN 0003-6951. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/5.0031891>>.

- Hdz – Jasso, A.; Contreras – Valenzuela, M.; Rodríguez – Martínez, A.; ROMERO, R.; VENEGAS, M. Experimental heat transformer monitoring based on linear modelling and statistical control process. *Applied Thermal Engineering*, v. 75, p. 1271–1286, 2015. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431114007856>>.
- HEINRICH JUAN C.; PEPPER, D. W. *The finite element method : basic concepts and applications with MATLAB, MAPLE, and COMSOL*. Third edition. [S.l.]: CRC Press, 2017. (Series in Computational and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences).
- HOPKINS, C. *Sound insulation*. [S.l.]: Routledge, 2012.
- HORVATH, J.; CAMERON, R. *Mastering 3D printing*. [S.l.]: Springer, 2014.
- HUANG, F.; HE, Y.; FAN, W.; JIN, S. Manufacturing process improvement for subcontracting production. *IFAC-PapersOnLine*, v. 55, n. 10, p. 1398–1403, 2022. ISSN 2405-8963. 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322018948>>.
- HÜGEL, H. New solid-state lasers and their application potentials. *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, v. 34, n. 4-6, p. 213–229, 2000.
- HUSSEIN, M. I.; LEAMY, M. J.; RUZZENE, M. Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress, and future outlook. *Applied Mechanics Reviews*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 66, n. 4, 2014.
- INGARD, U. *Noise reduction analysis*. [S.l.]: Jones & Bartlett Publishers, 2009.
- ISO:10534-2. *Acoustics-Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes-Part 2: Transfer-Function Method*. [S.l.]: CEN, European Committee for Standardization Brussels, Belgium, 1998.
- JACOBSEN, F.; POULSEN, T.; RINDEL, J. H.; GADE, A. C.; OHLRICH, M. *Fundamentals of acoustics and noise control*. Lyngby-Tårnbæk: Technical University of Denmark, 2011.
- JEON, J. Y.; HONG, S. H.; CHOI, E. Y.; BOK, E.; CHOI, S. H.; SEO, J. W. Intuitive understandings of negative bulk modulus of metamaterials composed of helmholtz resonators. *Current Applied Physics*, v. 29, p. 128–132, 2021. ISSN 1567-1739.
- JIANG, X.-Y. *Metamaterial*. Croatia: BoD–Books on Demand, 2012.
- JIMÉNEZ, N.; HUANG, W.; ROMERO-GARCÍA, V.; PAGNEUX, V.; GROBY, J.-P. Ultra-thin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption. *Applied Physics Letters*, AIP Publishing LLC, v. 109, n. 12, p. 121902, 2016.
- JIN, M.; LIANG, B.; YANG, J.; YANG, J.; CHENG, J.-c. Ultrathin planar metasurface-based acoustic energy harvester with deep subwavelength thickness and mechanical rigidity. *Scientific reports*, Nature Publishing Group UK London, v. 9, n. 1, p. 11152, 2019.

- KELLER, D. S.; Reif de Paula, T.; YU, G.; ZHANG, H.; AL-MAZROU, A.; KIRAN, R. P. Statistical process control (spc) to drive improvement in length of stay after colorectal surgery. *The American Journal of Surgery*, v. 219, n. 6, p. 1006–1011, 2020. ISSN 0002-9610. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0002961019310773>>.
- KUTTRUFF, H. *Room acoustics*. New York: Crc Press, 2016.
- LANGFELDT, F.; GLEINE, W. Membrane- and plate-type acoustic metamaterials with elastic unit cell edges. *Journal of Sound and Vibration*, v. 453, p. 65–86, 2019. ISSN 0022-460X.
- LANGFELDT, F.; KHATOKAR, A.; GLEINE, W. Plate-type acoustic metamaterials with integrated helmholtz resonators. *Applied Acoustics*, v. 199, p. 109019, 2022. ISSN 0003-682X.
- LANGFELDT, F.; RIECKEN, J.; GLEINE, W.; von Estorff, O. A membrane-type acoustic metamaterial with adjustable acoustic properties. *Journal of Sound and Vibration*, v. 373, p. 1–18, 2016. ISSN 0022-460X.
- LEVINSON, W. *Statistical Process Control for Real-World Applications*. [S.l.]: CRC Press, 2010. ISBN 9781439820018.
- LIU, C. R.; WU, J. H.; YANG, Z.; MA, F. Ultra-broadband acoustic absorption of a thin microperforated panel metamaterial with multi-order resonance. *Composite Structures*, Elsevier, v. 246, p. 112366, 2020.
- LIU, Z.; ZHANG, X.; MAO, Y.; ZHU, Y.; YANG, Z.; CHAN, C. T.; SHENG, P. Locally resonant sonic materials. *science*, American Association for the Advancement of Science, v. 289, n. 5485, p. 1734–1736, 2000.
- LOUZADA, F.; DINIZ, C.; FERREIRA, P.; FERREIRA, E. *Controle estatístico de processos: uma abordagem prática para cursos de engenharia e administração*. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2013.
- LOVELOCK, R. K. Acoustic metamaterials: ‘the influence of boundary effects on resonant acoustic transmission through a thin slit’. University of Exeter, 2014.
- LÓPEZ-TARJUELO, J.; LUQUERO-LLOPIS, N.; GARCÍA-MOLLÁ, R.; QUIRÓS-HIGUERAS, J. D.; BOUCHÉ-BABILONI, A.; JUAN-SENABRE, X. J.; de Marco-Blancas, N.; FERRER-ALBIACH, C.; SANTOS-SERRA, A. Statistical process control for electron beam monitoring. *Physica Medica*, v. 31, n. 5, p. 493–500, 2015. ISSN 1120-1797. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1120179715001167>>.
- MAA, D.-Y. Theory of microslit absorbers. *Acta Acustica*, v. 25, n. 6, p. 481–485, 2000.
- MAREZE, P. H. *Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida*. 325 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- MONTGOMERY, D. C. *Statistical Quality Control*. 7. ed. [S.l.]: Wiley, 2012. ISBN 1118146816,9781118146811.

- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros, 2^a. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.
- NILSSON, J.; CLARKSON, W.; SELVAS, R.; SAHU, J.; TURNER, P.; ALAM, S.-U.; GRUDININ, A. High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers. *Optical Fiber Technology*, Elsevier, v. 10, n. 1, p. 5–30, 2004.
- OAKLAND, J. S. *Statistical process control*. [S.l.]: Routledge, 2007.
- OKUZONO, T.; NITTA, T.; SAKAGAMI, K. Note on microperforated panel model using equivalent-fluid-based absorption elements. *Acoustical Science and Technology*, Acoustical Society of Japan, v. 40, n. 3, p. 221–224, 2019.
- PAI, P. F.; HUANG, G. *Theory and design of acoustic metamaterials*. [S.l.]: SPIE Press, 2015.
- PAUL, M. C. *Fiber Laser*. Rijeka: IntechOpen, 2016. ISBN 978-953-51-2257-9.
- PENDRY, J. B. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical review letters*, APS, v. 85, n. 18, p. 3966, 2000.
- PETKOVSKA, L.; CVETKOVSKI, G. Optimal design exploiting 3d printing and metamaterials. In: . [S.l.]: IET The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2021.
- POWELL, J. *CO2 laser cutting*. London: Springer, 1993. v. 214.
- RAYLEIGH, L. Theory of sound, band ii. *McMillan, London*, 1894.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, S. t. C. *Série monográfica Qualidade Controle Estatístico do Processo Cartas de Controle para Variáveis, Cartas de Controle para Atributos, Função de Perda Quadrática, Análise de Sistemas de Medição*. 172 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- RIZZATTI, R. S. *Uso de metamaterial no tratamento acústico de painel duplo*. 155 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- ROMERO-GARCIA, V.; HLADKY-HENNION, A.-C. *Fundamentals and applications of acoustic metamaterials: from seismic to radio frequency*. London: John Wiley & Sons, 2019.
- ROSSING, T. D. *Springer handbook of acoustics*. New York: Springer, 2014.
- SANTOS, L. A. *Absorvedor sonoro baseado em ressonadores com micro fendas acopladas*. 2022. Universidade Federal de Santa Catarina. 61 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2022.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, [Oxford University Press, Biometrika Trust], v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965. ISSN 00063444. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2333709>>.
- SHEWHART, W. A. *Economic control of quality of manufactured product*. London: Macmillan And Co Ltd, 1931.

SOUSA, A. R. C. d. *Modelagem de metamaterial acústico para absorção sonora em baixas frequências*. 143 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SOUSA, S.; RODRIGUES, N.; NUNES, E. Application of spc and quality tools for process improvement. *Procedia Manufacturing*, v. 11, p. 1215–1222, 2017. ISSN 2351-9789. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917304559>>.

STAUDHAMMER, C. L.; LEMAY, V. M.; KOZAK, R. A.; MANESS, T. C. Mixed-model development for real-time statistical process control data in wood products manufacturing. *Forest Biometry, Modelling and Information Sciences*, v. 1, p. 19–35, 2005.

STINSON, M. R. The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 89, n. 2, p. 550–558, 1991.

TABATABAIAN, M. *COMSOL for Engineers*. Mercury Learning & Information, 2014. (Multiphysics Modeling). ISBN 1938549538,9781938549533. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=8a98a670d445daf3c69fd0b3425c2075>>.

TAN, K. T.; HUANG, H.; SUN, C. Optimizing the band gap of effective mass negativity in acoustic metamaterials. *Applied Physics Letters*, American Institute of Physics, v. 101, n. 24, p. 241902, 2012.

TANG, Y.; REN, S.; MENG, H.; XIN, F.; HUANG, L.; CHEN, T.; ZHANG, C.; LU, T. J. Hybrid acoustic metamaterial as super absorber for broadband low-frequency sound. *Scientific reports*, Nature Publishing Group UK London, v. 7, n. 1, p. 43340, 2017.

TESFAY, Y. *Developing Structured Procedural and Methodological Engineering Designs: Applied Industrial Engineering Tools*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2021. ISBN 9783030684020.

VERGARA, E. F.; ALMEIDA, G. N.; BARBOSA, L. R.; LENZI, A.; SOUSA, A. Carvalho de. Broadband and low-frequency sound absorption of modified Helmholtz resonator combined with porous layer addition. *Journal of Applied Physics*, v. 132, n. 13, p. 135114, 10 2022. ISSN 0021-8979. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/5.0108807>>.

VESELAGO, V. G. Electrodynamics of substances with simultaneously negative and. *Usp. fiz. nauk*, v. 92, n. 7, p. 517–526, 1967.

VILLAMIL, H. R. *Acoustic properties of microperforated panels and their optimization by Simulated Annealing*. 202 p. Tese (Doutorado) — Escuela Técnica Superior De Ingenieros, Universidad Politécnica De Madrid, Madrid, 2012.

WANG, Y.; ZHAO, H.; YANG, H.; ZHONG, J.; WEN, J. A space-coiled acoustic metamaterial with tunable low-frequency sound absorption. *EPL (Europhysics Letters)*, IOP Publishing, v. 120, n. 5, p. 54001, 2018.

WANG, Y.; ZHAO, H.; YANG, H.; ZHONG, J.; ZHAO, D.; LU, Z.; WEN, J. A tunable sound-absorbing metamaterial based on coiled-up space. *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing LLC, v. 123, n. 18, p. 185109, 2018.

- WEBB, C.; JONES, J. D. *Handbook of Laser Technology and Applications: Volume 3: Applications*. London: Institute of Physics, 2004.
- WEI, S.; LI, L.; ZHIGANG, C.; LINYONG, L.; XIAOPENG, F. A parameter design method for multifrequency perfect sound-absorbing metasurface with critical coupled helmholtz resonator. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 40, n. 4, p. 2054–2063, 2021.
- WEIGLHOFER, W. S.; LAKHTAKIA, A. *Introduction to complex mediums for optics and electromagnetics*. Washington: SPIE press, 2003. v. 123.
- WU, X.; AU-YEUNG, K. Y.; LI, X.; ROBERTS, R. C.; TIAN, J.; HU, C.; HUANG, Y.; WANG, S.; YANG, Z.; WEN, W. High-efficiency ventilated metamaterial absorber at low frequency. *Applied Physics Letters*, v. 112, n. 10, p. 103505, 03 2018. ISSN 0003-6951. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.5025114>>.
- YUNKER, W. N. *Sound attenuation using MEMS fabricated acoustic metamaterials*. 143 p. Dissertação (Mestrado) — Graduate Faculty of Auburn University, Graduate Faculty of Auburn University, Auburn, 2012.

APÊNDICE A – Análise de Sensibilidade

A.1 Análise de sensibilidade dos modelos de MMA

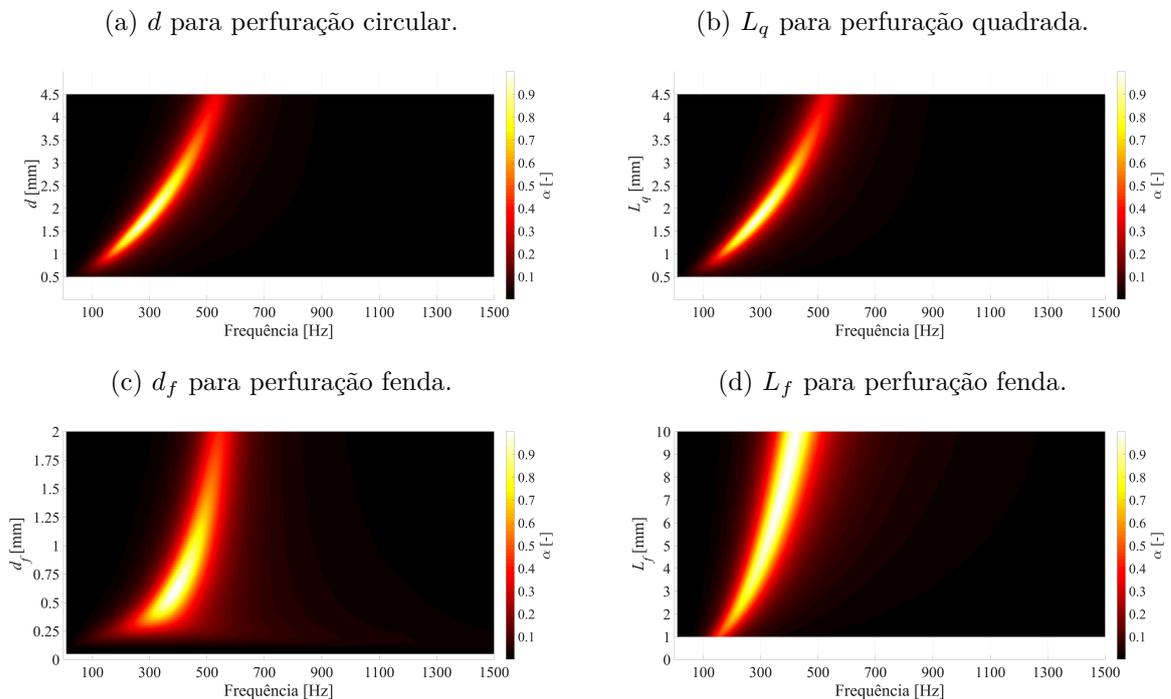
A análise de sensibilidade consiste em verificar todas as dependências das equações de impedância acústica com relação aos parâmetros geométricos do metamaterial acústico. O dimensionamento da perfuração depende de cinco variáveis, d : diâmetro perfuração circular (ver Figura 11b), L_q : lateral perfuração quadrada (ver Figura 12b), d_f : menor dimensão perfuração fenda, L_f : maior dimensão perfuração fenda (ver Figura 13b) e t : espessura do painel frontal (ver Figura 13b). A cavidade é projetada, principalmente, a partir de quadro dimensões, m : largura da cavidade, L : comprimento da cavidade, h : altura interna e b_0 : espessura das paredes da cavidade (ver Figura 10b). Os resultados da análise podem ser apresentados por gráficos de superfície, onde no eixo x e y são representados respectivamente a frequência e o parâmetro de estudo, o valor da absorção sonora é representada pelo eixo z , convertido ao plano bidimensional utilizando cores, sendo que os escuros significam baixa absorção e regiões com alta absorção sonora é demonstrada por cores próximas ao branco. Dessa forma, o dimensionamento da amostra é facilitado, por ser possível identificar, de maneira visual, qual das variáveis é mais influente para o material atingir as características de absorção sonora desejadas.

A.1.1 Perfuração

O comportamento da absorção sonora foi estudado para diferentes perfurações. Para o perfil do tipo circular e quadrado, as dimensões d e L_q foram variadas de 0,5 mm a 4,5 mm, e os resultados são mostrados na Figura 81a e Figura 81b para as respectivas perfurações. A perfuração fenda possui dois parâmetros, d_f e L_f , os quais foram variados respectivamente de 0,05 mm a 2,0 mm e de 1,0 mm a 10,0 mm, com resultados disponíveis na Figura 81c e Figura 81d.

O coeficiente de absorção sonora para os parâmetros d e L_q apresentou uma faixa com valores acima de 0,5 de absorção sonora ocorridos para frequências entre 150 e 550 Hz. É possível perceber que com a redução da dimensão da perfuração, existe a tendência de reduzir a frequência onde ocorre o pico de absorção. Para a perfuração fenda, os resultados dos parâmetros foram distintos entre si. O valor de d_f seguiu a tendência apresentada pelos parâmetros d e L_q , mas com largura de absorção sonora acima de 50% para frequências entre 250 Hz e 550 Hz. Por último, o parâmetro L_f apresentou elevação da frequência pico de absorção com o aumento da dimensão, além disso, demonstrou o valor de α acima de 0,5 para dimensões acima de 1,5 mm, e faixa de frequência entre 150 Hz e 550 Hz.

Figura 81 – Coeficiente de absorção sonora para a variação do parâmetro da perfuração com dimensões fixas: $t = 3,0$ mm; $L = 50,0$ mm; $m = 15,0$ mm; $h = 30,0$ mm; $T = 3,0$ mm e $b_0 = 3,0$ mm.



Fonte: O autor.

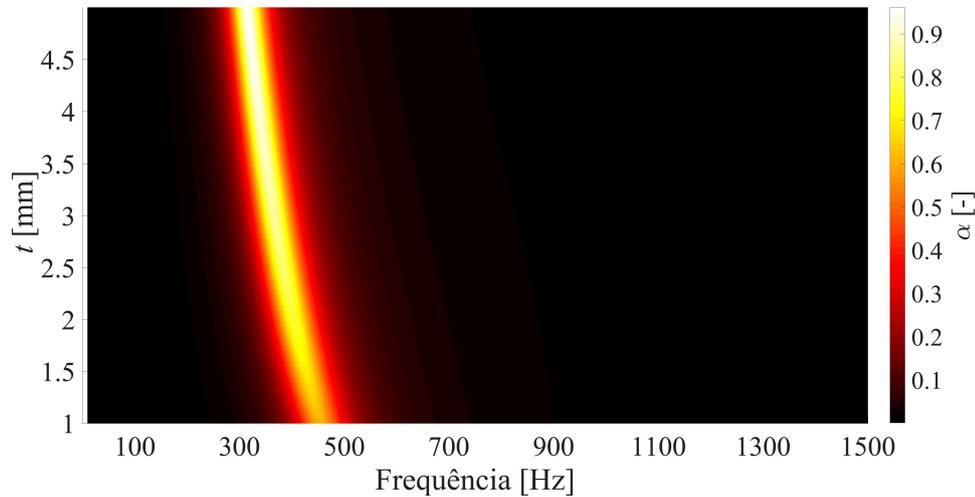
A principal diferença para a perfuração fenda está no fato das duas dimensões atuarem simultaneamente para dar o comportamento da amostra, desta maneira existe o indicativo que a combinação das dimensões d_f e L_f permita que a perfuração fenda atue com absorção próximo ao valor unitário, para a faixa que as demais perfurações permanecem próximo ao valor de 50% de absorção.

A espessura do painel frontal (t), parâmetro que também representa a profundidade para todas as perfurações, foi variado de 1 mm a 5 mm. Para a avaliação entre 0 Hz e 1.500 Hz e para perfuração circular, o coeficiente de absorção sonora apresentou uma faixa principal com α acima de 0,5, para as frequências entre 300 Hz e 500 Hz, conforme ilustrado na Figura 82. Com o aumento de t o pico de absorção principal desloca-se para as baixas frequências, essa alteração no pico de absorção sonora deve-se ao aumento da resistência acústica na perfuração, fazendo um efeito parecido à redução do diâmetro da perfuração (d).

A.1.2 Cavidade

As dimensões utilizadas para construção das cavidades foram variadas para a determinação do comportamento da absorção sonora. A altura (h) foi variada de 10 mm a 40 mm, a largura da cavidade (m) foi estudada para 10 mm a 30 mm, os resultados da análise de sensibilidade para estas dimensões estão expostos respectivamente nas Figura 83a

Figura 82 – Coeficiente de absorção sonora para a variação do parâmetro t e amostra com perfuração circular e dimensões fixas: $d = 2,4$ mm; $L = 50,0$ mm; $m = 15,0$ mm; $h = 30,0$ mm; $T = 3,0$ mm e $b_0 = 3,0$ mm.



Fonte: O autor.

e Figura 83b. Houve semelhança entre o comportamento das amostras, com o aumento da respectiva dimensão, o pico de absorção tendeu a ocorrer em frequências menores. Foi percebido uma faixa com absorção sonora acima de 50%, para os valores de 250 Hz a 650 Hz para o parâmetro h e entre 200 Hz e 550 Hz para a dimensão m .

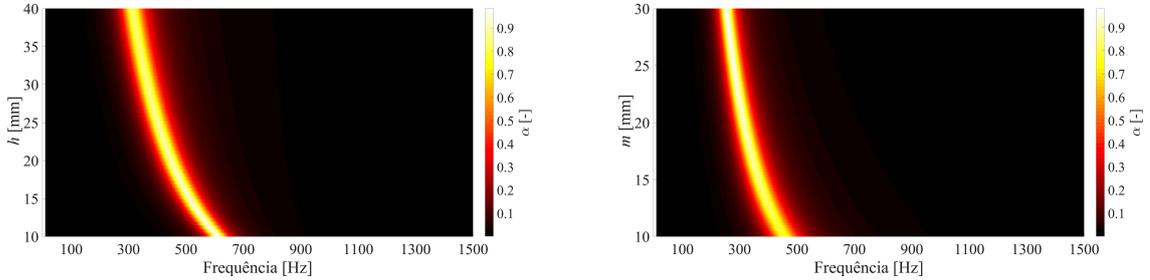
Por fim, foi analisado o efeito da variação do comprimento da cavidade de ar e a espessura das cavidades no comportamento da absorção sonora. Com variação de 20 mm a 90 mm para L e 1 mm a 4 mm para b_0 , foi percebido diferenças entre os comportamentos apresentados na Figura 83c e Figura 83d. O comprimento da cavidade apresentou duas faixas com α acima de 0,5 para as frequências de 200 Hz a 650 Hz e 1.100 a 1.500 Hz, para ambas faixas com o aumento de L tendeu a reduzir a frequência onde ocorreu o pico de absorção. Entretanto, b_0 resultou apenas em uma faixa com absorção sonora acima de 50%, entre 250 Hz e 500 Hz, além disso, com o aumento da espessura do metamaterial, resultou no aumento da frequência com o pico de absorção. Fato justificado, pela dependência desta variável para determinação da largura efetiva da cavidade interna de metamaterial acústico, com o maior valor da espessura b_0 , necessariamente resulta na redução do volume interno da cavidade, e por consequência ocorre o aumento da frequência de sintonia do material.

A.1.3 Síntese da análise de sensibilidade

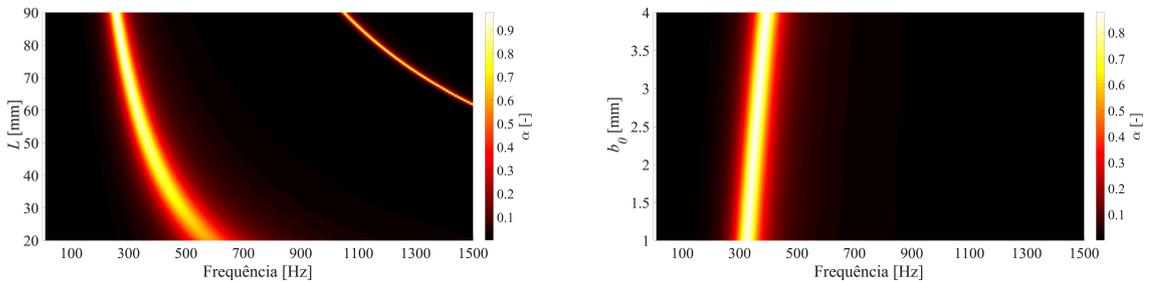
Todas as variáveis estudadas tiveram influência no comportamento final do coeficiente de absorção sonora de cada amostra. Com a mudança de apenas um parâmetro, existe uma faixa com cerca de 300 Hz de largura no qual o pico de absorção da amostra pode ser alterado. Deste modo, como a técnica de corte a laser facilita a alteração do painel

Figura 83 – Coeficiente de absorção sonora para a variação do parâmetro da cavidade com dimensões fixas: $t = 3,0$ mm; $T = 3,0$ mm e $d = 2,4$ mm.

- (a) valores de h para $L = 50,0$ mm; $m = 15,0$ mm e (b) valores de m para $L = 50,0$ mm; $h = 30,0$ mm e $b_0 = 3,0$ mm.



- (c) valores de L para $h = 30,0$ mm; $m = 15,0$ mm e (d) valores de b_0 para $L = 50,0$ mm; $m = 15,0$ mm e $h = 30,0$ mm.



Fonte: O autor.

frontal microperfurado após construída a cavidade da amostra, a mudança dos parâmetros relacionados com a perfuração é facilitada. Com relação às dimensões da cavidade, os parâmetros h , m e L resultaram em uma largura de frequência onde é possível alterar o pico de absorção com cerca de 300 Hz, 250 Hz e 350 Hz, respectivamente. Com isto, o parâmetro L mostrou-se mais relevante na definição do comportamento da cavidade, além disso, por não aumentar a espessura final do metamaterial, existe menos restrição a esta mudança para construção de amostras a serem testadas experimentalmente no aparato de tubo de impedância.

APÊNDICE B – Imagens Adicionais

B.1 Construção amostras

Figura 84 – Processo de montagem de amostras de espaço enrolado, $n=2$ em acrílico.

(a) Fundo da amostra.

(b) Cavilhas e porcas de fixação.

(c) Primeira cavidade.



(d) Separação entre as cavidades.

(e) Segunda cavidade.

(f) Amostra completa.



Fonte: O autor.

B.2 Procedimento experimental

Figura 85 – Aparato do tubo de impedância.



Fonte: O autor.

Figura 86 – Detalhamento das amostras.



Fonte: O autor.

Figura 87 – Detalhamento do porta-amostra com massa de calafetar vedando as frestas.

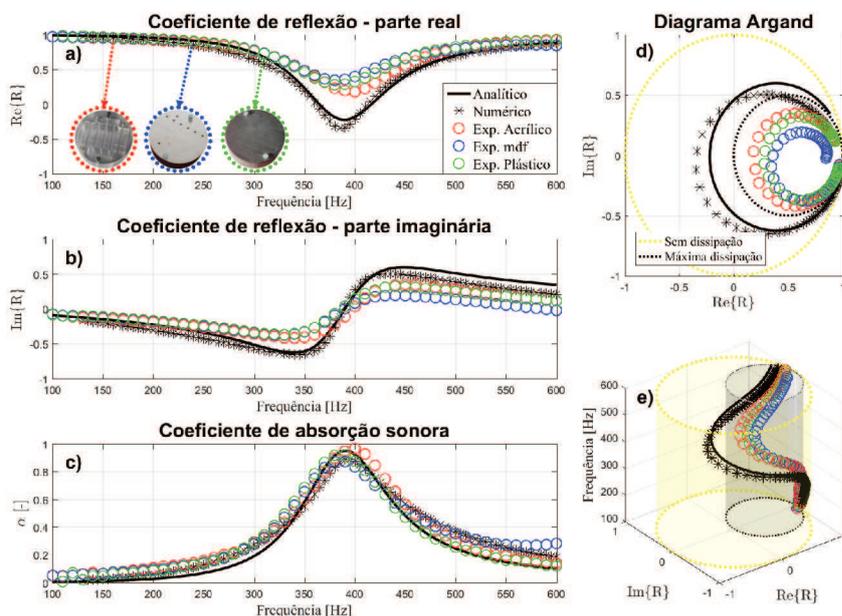


Fonte: O autor.

APÊNDICE C – Resultados Sem Correções

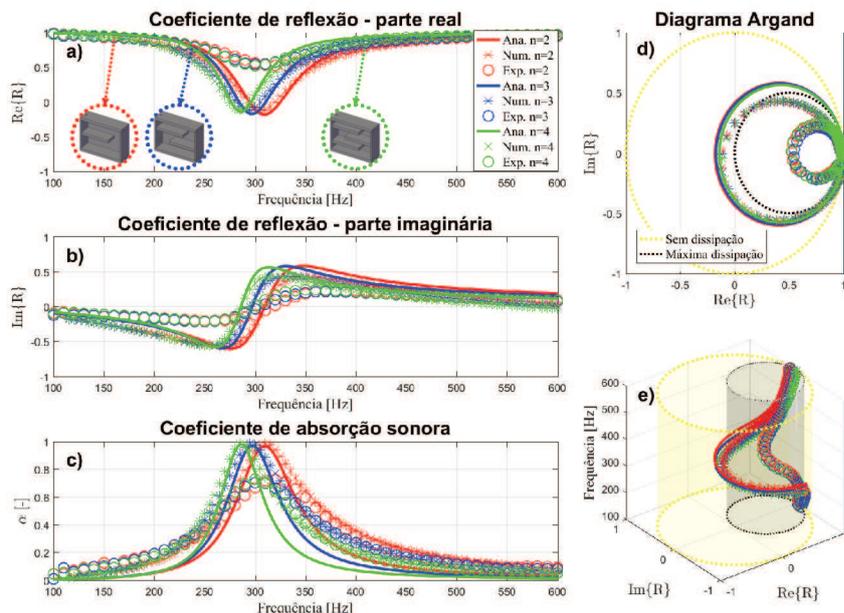
Os gráficos com os resultados das amostras apresentadas na Seção 6 foram reprocessados sem considerar as correções relativas ao fator de aproveitamento. Dessa forma, a Figura 88 exibe os resultados para a comparação entre amostras construídas com materiais distintos. A Figura 89 ilustra o desempenho para diferentes valores de enrolamento. Em seguida, as diversas perfurações são analisadas na Figura 90. Além disso, a construção de uma amostra com maior largura de banda de absorção é evidenciada nas Figuras 91 e 92. O efeito do vazamento também foi investigado e os resultados experimentais não alterados são mostrados na Figura 93. Finalmente, foi realizada uma análise de sensibilidade usando amostras com dimensões de fenda variáveis, a Figura 94 apresenta os resultados dos dados experimentais brutos.

Figura 88 – Comparativo dos resultados de amostras construídas com diferentes materiais com perfuração quadrada com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



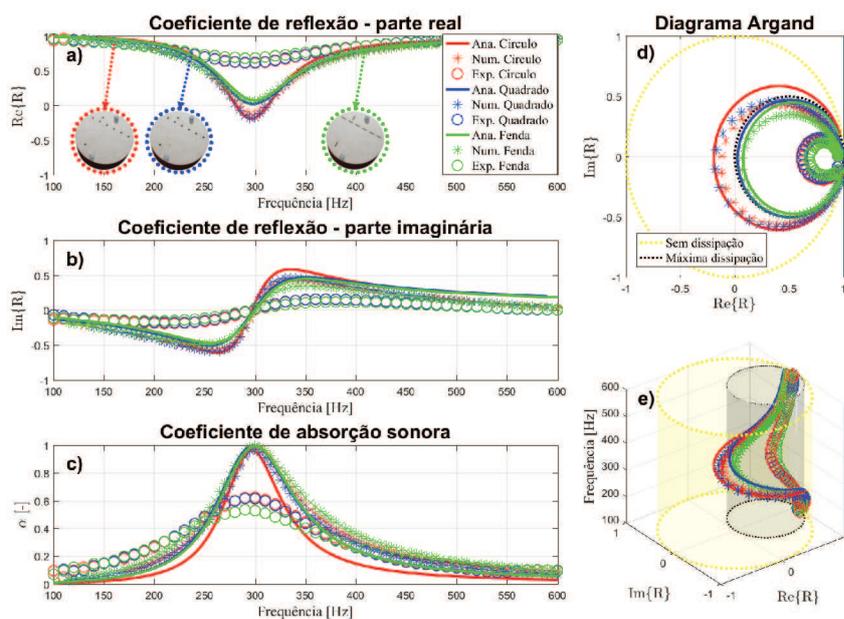
Fonte: O autor.

Figura 89 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes enrolamentos com perfuração circular com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



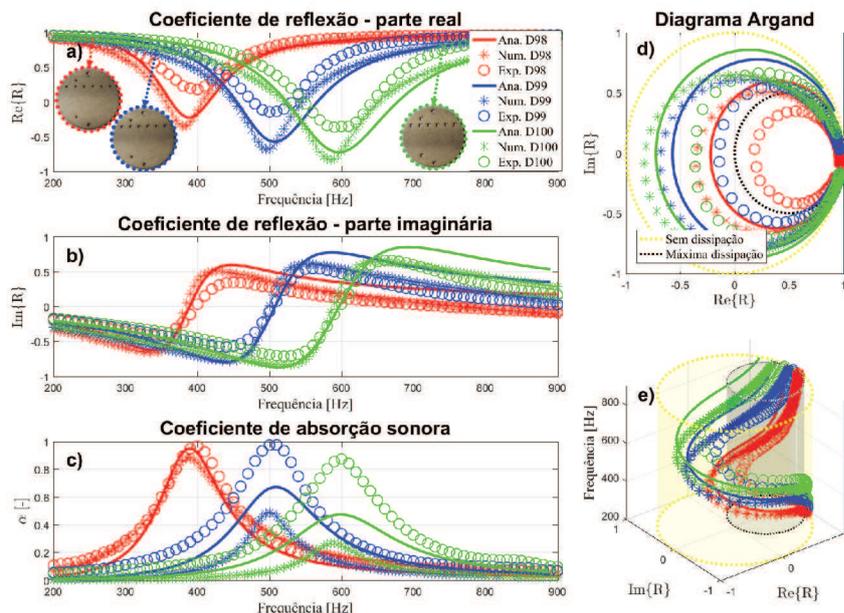
Fonte: O autor.

Figura 90 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com n=2 sintonizadas para frequência de 300 Hz com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



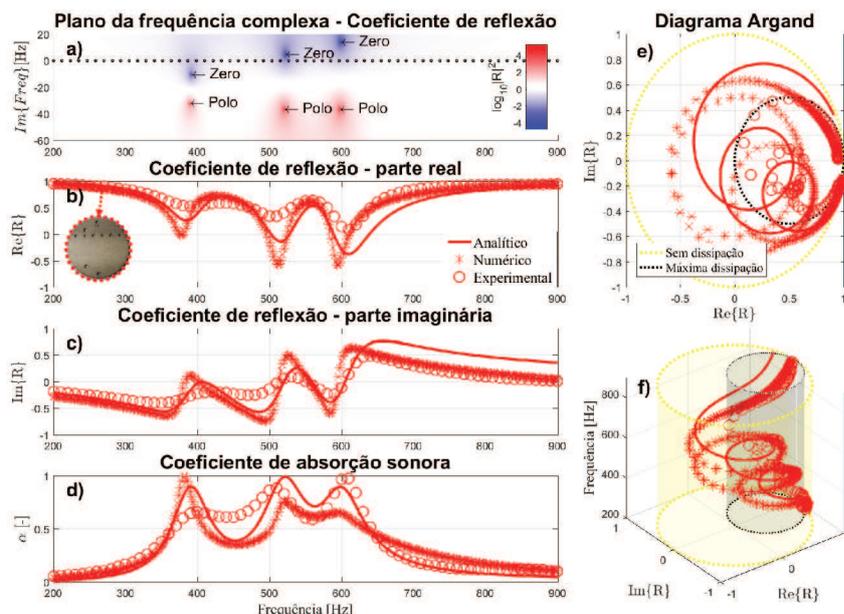
Fonte: O autor.

Figura 91 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com dimensões das cavidades constantes com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



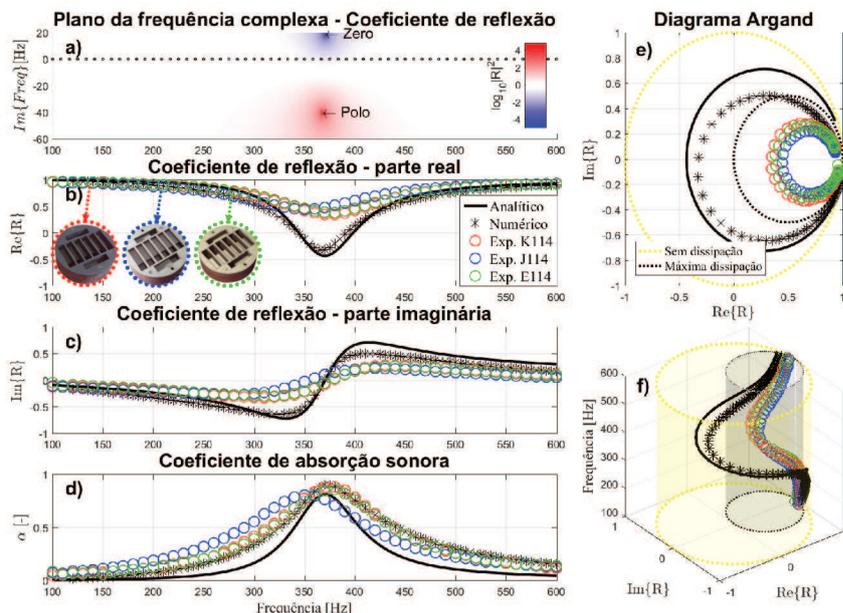
Fonte: O autor.

Figura 92 – Comparativo dos resultados para a amostra D106 com dados experimentais brutos. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



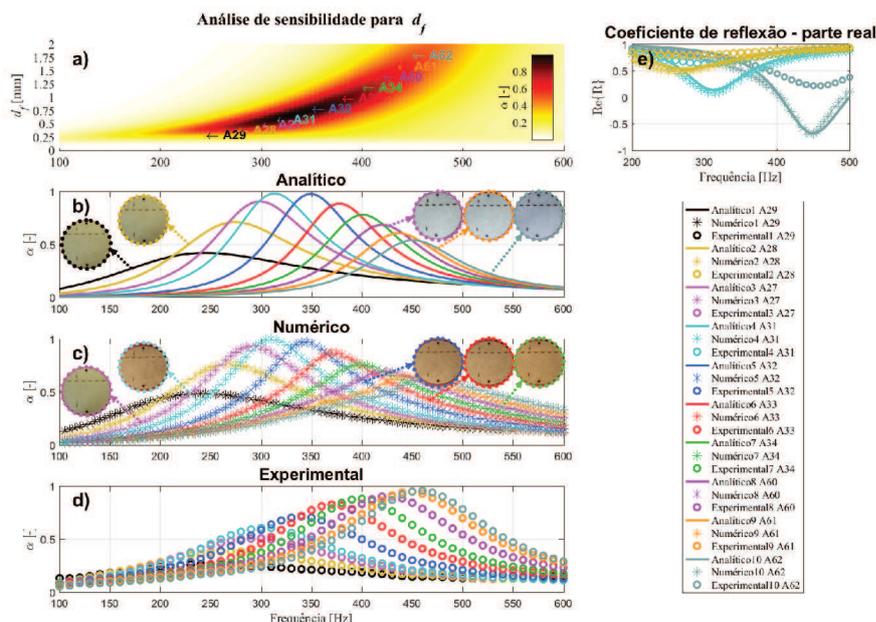
Fonte: O autor.

Figura 93 – Comparativo dos resultados de amostras com diferentes vedações das cavidades com dados experimentais brutos. a) Plano de frequência complexa. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. c) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. d) Absorção sonora. e) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. f) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



Fonte: O autor.

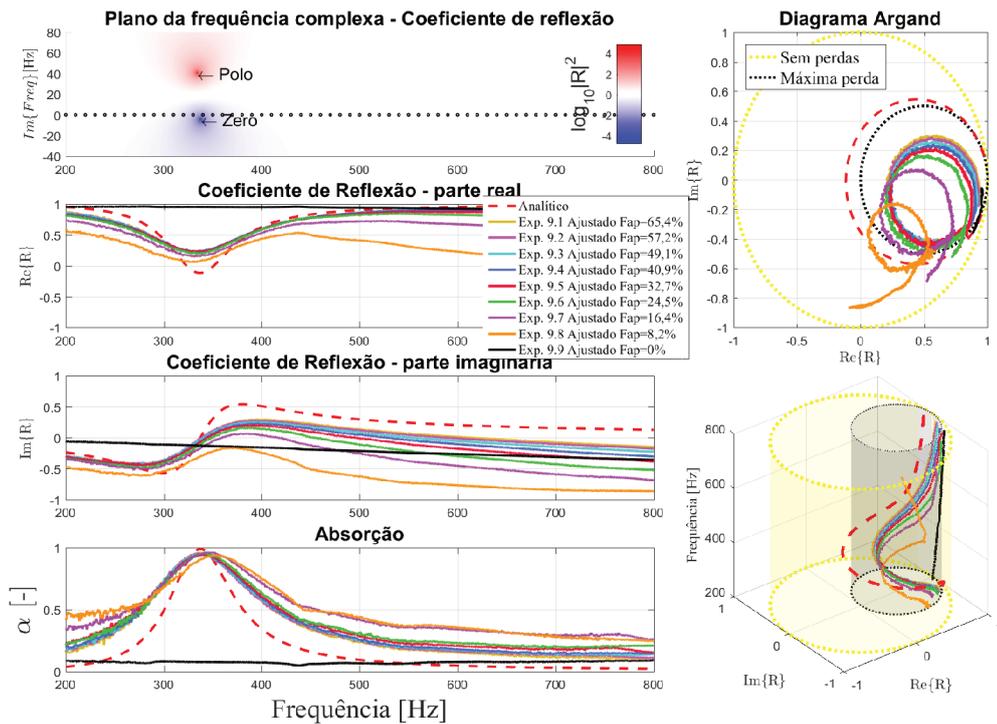
Figura 94 – Comparativo dos resultados de amostras com perfuração fenda, com parâmetro d_f variável com dados experimentais brutos. a) Análise de sensibilidade para a amostra A. b) Absorção sonora analítico. c) Absorção sonora numérico. d) Absorção sonora experimental. e) Coeficiente de reflexão parte real para as amostras A28, A31 e A62.



Fonte: O autor.

APÊNDICE D – Resultados Adicionais

Figura 95 – Aplicação do fator de correção para diferentes fatores de aproveitamento utilizando modelo sem corrigir absorção adicional da amostra $n=2$ - Circular ($d=2,13$ mm).

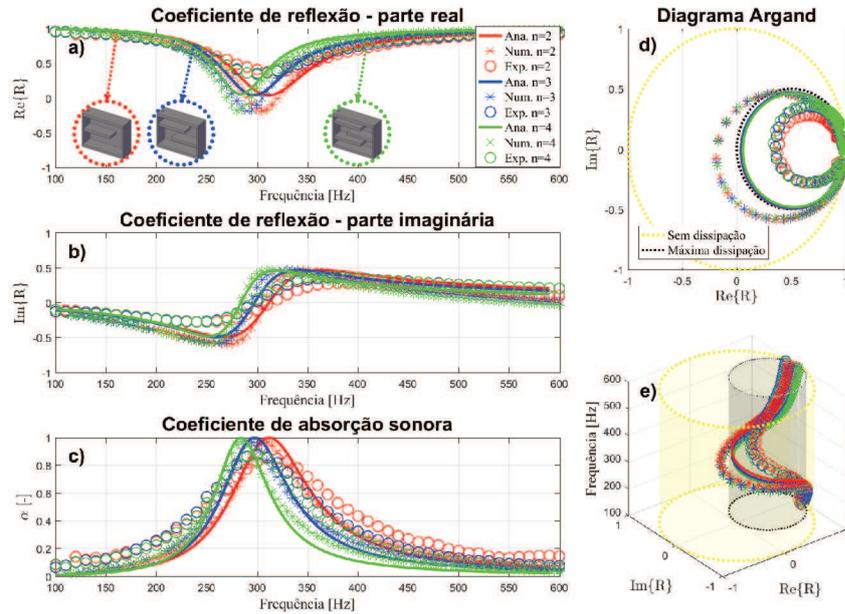


Fonte: O autor.

D.1 Diferentes enrolamentos

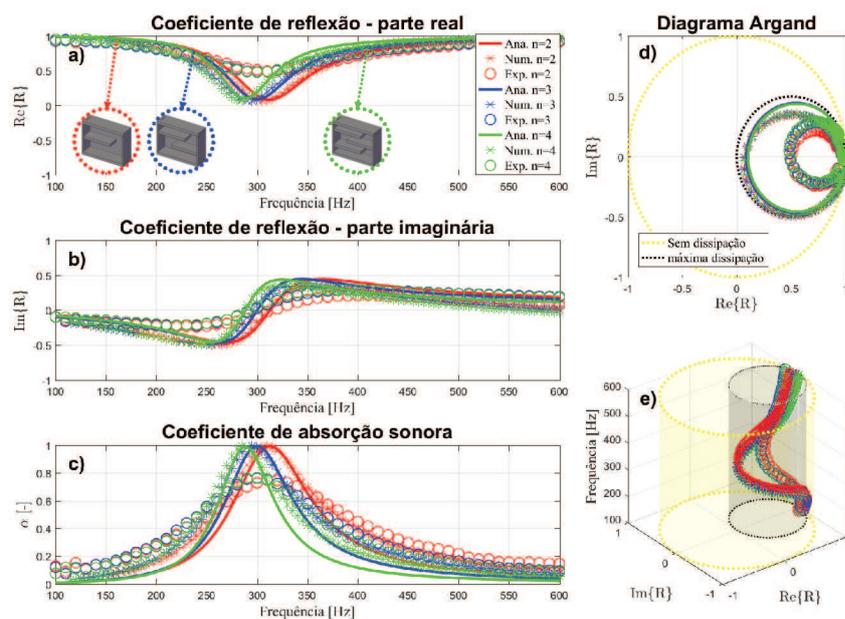
O efeito causado por mudanças no número de enrolamento em amostras projetadas utilizando o modelo de metamaterial do tipo espaço enrolado foi avaliado para perfurações adicionais, além da perfuração circular discutida no Capítulo 6.2. Os resultados foram expressos nas Figuras 96 e 97 para as perfurações quadrada e fenda, respectivamente. Para avaliar a perfuração quadrada, foram utilizadas as amostras com os códigos E112, F112 e G112. Já o desempenho das perfurações fenda foi avaliado com as seguintes amostras: E113, F113 e G113. A tendência observada e discutida para as amostras com perfuração circular também ocorreu para as perfurações fenda e quadrada, ou seja, o aumento do número de enrolamento resultou em uma redução da frequência em que ocorre o pico de absorção.

Figura 96 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes enrolamentos com perfuração quadrada. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.



Fonte: O autor.

Figura 97 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes enrolamentos com perfuração fenda. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama Argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.

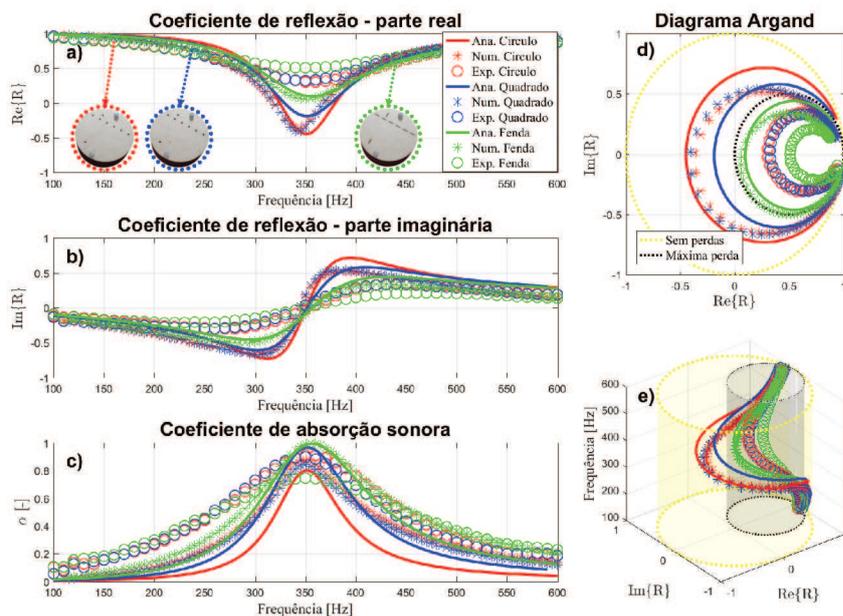


Fonte: O autor.

D.2 Pico de absorção em 350 Hz

No Capítulo 6.3, discutiu-se o resultado para amostras projetadas com máxima absorção na mesma frequência, sendo escolhida a frequência de 300 Hz nessa situação. No entanto, um novo alvo foi selecionado em 350 Hz, utilizando amostras com a seguinte codificação: A114, A115 e A116. Os desempenhos estão expressos na Figura 98. Observou-se que o resultado experimental para o modelo de perfuração fenda foi inferior aos das outras perfurações, fato que já havia sido encontrado para as amostras sintonizadas em 300 Hz, indicando que a mesma variável foi a responsável pelo efeito. Ao verificar o Diagrama de Argand (Figura d), notou-se que os valores dos modelos analíticos e numéricos foram projetados para além do círculo de máxima dissipação. Esse fato, aliado ao menor fator de aproveitamento das amostras, faz com que o desempenho acústico das amostras construídas seja superior.

Figura 98 – Comparativo dos resultados de amostras para diferentes perfurações, com $n=2$ sintonizadas para frequência de 350 Hz. a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. d) Diagrama argand 2D para o coeficiente de reflexão. e) Diagrama Argand 3D para o coeficiente de reflexão.

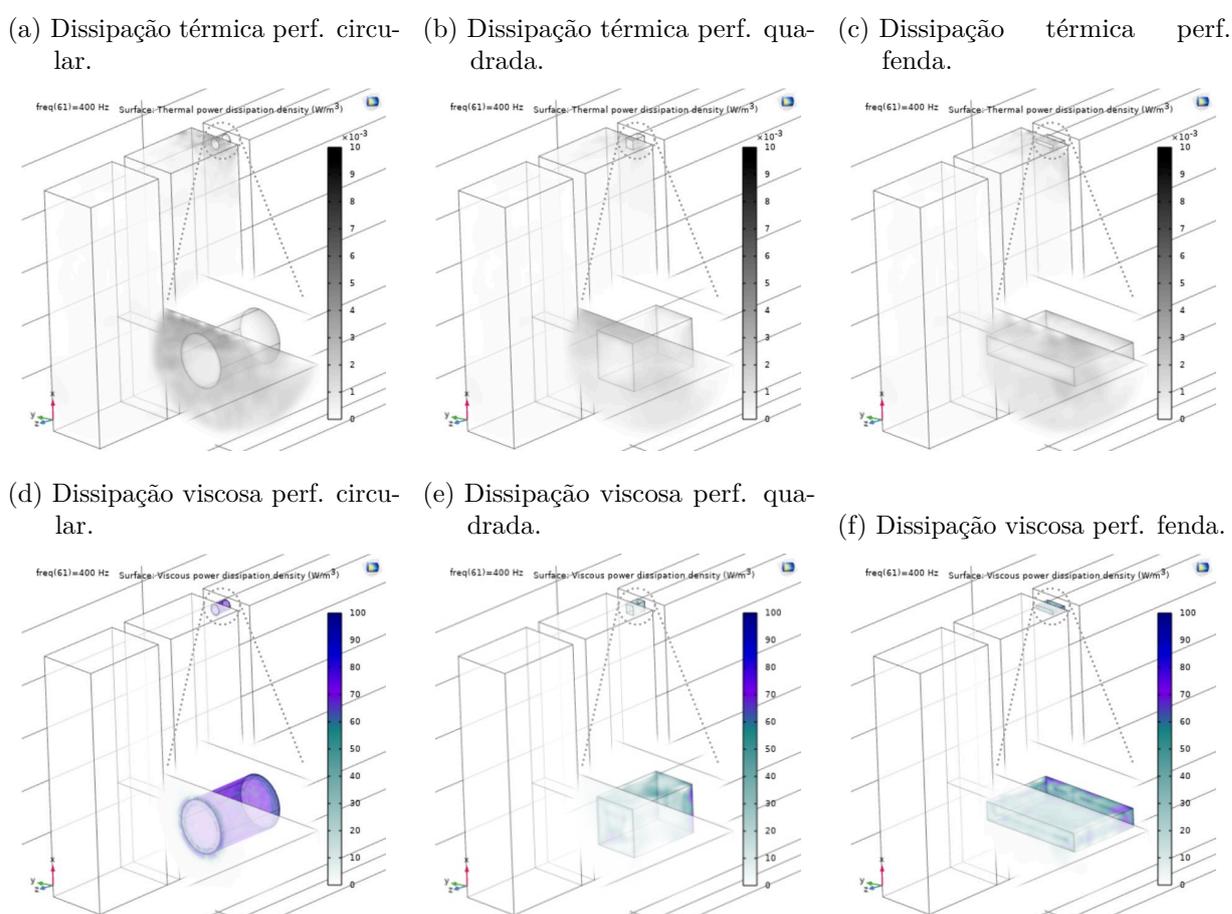


Fonte: O autor.

D.3 Investigação numérica da dissipação termo-viscosa

Foram avaliadas as perdas térmicas e viscosas que ocorrem no interior da cavidade e da perfuração da amostra de metamaterial, para a frequência de ressonância da amostra (400 Hz). Os resultados estão expressos na Figura 99. A análise comparativa entre os dois fenômenos que causam perdas indica maior efetividade para mecanismos viscosos, que ocorrem predominantemente nas perfurações. As perdas térmicas apresentam menor efetividade, no entanto, ocorrem em uma região ampla no interior da amostra.

Figura 99 – Dissipação térmica e viscosa, avaliadas de maneira independente com o modelo numérico.



Fonte: O autor.