



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Victor Henrique Piovesan Bahú

**Estudo de absorvedor acústico híbrido: metamaterial com material poroso**

Florianópolis

2024

Victor Henrique Piovesan Bahú

**Estudo de absorvedor acústico híbrido: metamaterial com material poroso**

Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Campus Florianópolis da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica com ênfase em Acústica e Vibrações.

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

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Bahú, Victor Henrique Piovesan

Estudo de absorvedor acústico híbrido: metamaterial com material poroso / Victor Henrique Piovesan Bahú ; orientador, Erasmo Felipe Vergara Miranda, 2024.

138 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Metamaterial híbrido. 3. Material poroso. 4. Espaços enrolados. 5. Baixa frequência. I. Miranda, Erasmo Felipe Vergara. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Victor Henrique Piovesan Bahú

**Estudo de absorvedor acústico híbrido: metamaterial com material poroso**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 27 de março de 2024 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Erasmo Felipe Vergara Miranda, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Arcanjo Lenzi, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leandro Rodrigues Barbosa, Dr.  
WAVE - Soluções e projetos em acústica

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 com ênfase em Acústica e Vibrações.

---

Prof. Henrique Simas

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

Prof. Erasmo Felipe Vergara Miranda, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 2024.

Este trabalho é dedicado a minha família, mas principalmente aos meus queridos pais que sempre estiveram presente em minha vida acadêmica e incentivaram a busca pelo conhecimento como um bem extraordinário e inestimável.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente ao professor Erasmo Felipe Vergara por aceitar me orientar no desenvolvimento deste trabalho mesmo com prazos reduzidos, pelas discussões e ajudas diversas que foram dadas durante o desenvolvimento.

Ao colega Gildean por estar sempre disposto a tirar dúvidas sobre o que ele conhece do assunto deste trabalho, ajuda com os experimentos, modelagem numérica e as demais conversas e discussões sempre muito proveitosas durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Iago que me ajudou demais a partir do conhecimento por ele construído durante o trabalho de mestrado dele, pelas discussões que por vezes levavam horas sobre o trabalho que ele já havia feito e como eu poderia aproveitar e melhorar para o meu.

Aos restante dos colegas do grupo de metamateriais do professor Vergara, Linconl, Lucas, Kleyton pelas tardes de conversas e discussões prazerosas.

Agradeço a todos os colegas do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) que tive contato e ajuda durante as matérias.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e por ajudar na finalização deste trabalho.

Por fim, ao Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) pela oportunidade da realização deste trabalho.

## RESUMO

Na procura das melhores alternativas para tratamento acústico têm sido desenvolvidos os materiais conhecidos como metamateriais, os quais são capazes de substituir os absorvedores tradicionais quando utilizados para baixa frequência, com faixa de utilização podendo variar de 100 a 600 Hz e ainda com grande possibilidade de customização. Buscando aumentar ainda mais a capacidade desses absorvedores sonoros, este trabalho propõe a substituição de parte do espaço enrolado do metamaterial labiríntico por materiais absorvedores porosos (melamina e lã de pet) para melhorar o controle da energia sonora tanto em baixas como em médias frequências. As amostras desses metamateriais utilizaram peças de MDF cortadas a laser e montadas por camadas, permitindo sua modificação posterior para instalar e alterar o posicionamento do material poroso no interior da cavidade labiríntica. Três posições foram propostas para instalar o material poroso acoplado ao metamaterial acústico ajustável, sendo avaliado o desempenho da absorção sonora por meio de modelo analítico, simulação computacional e ensaios em tubo de impedância para incidência sonora normal. Os resultados experimentais da absorção sonora de 92 testes foram confrontados com os resultados do modelo teórico e numérico para compreender os efeitos acústicos gerados pela adição do material poroso no interior do metamaterial. Em geral, os resultados apresentam uma diminuição da absorção sonora máxima do metamaterial híbrido desenvolvido, porém foi obtido um aumento da largura da banda de frequências para faixas de absorção de 50% da energia sonora. Com este design de metamaterial acústico de cavidades enroladas e a aplicação interna de materiais porosos é possível obter o controle da largura da banda de frequências e da absorção sonora máxima para aplicações possíveis para redução do ruído em baixas frequências.

**Palavras-chave:** Metamaterial acústico híbrido. Frequências baixas. Material poroso. Absorção sonora. Espaços enrolados.

## ABSTRACT

In the search for the best alternatives for acoustic treatment, materials known as metamaterials have been developed. These materials are capable of replacing traditional absorbers when used for low frequencies, with a usage range that can vary from 100 to 600 Hz and significant customization possibilities. To further enhance the performance of these sound absorbers, this study proposes replacing part of the coiled space in the labyrinthine metamaterial with porous absorbing materials (such as melamine and PET wool) to improve control over sound energy in both low and medium frequencies. Laser-cut MDF pieces were used to create samples of these metamaterials, assembled in layers, allowing for subsequent modification to install and adjust the positioning of the porous material inside the labyrinth cavity. Three positions were proposed for installing the porous material coupled to the adjustable acoustic metamaterial. The sound absorption performance was evaluated through analytical modeling, computational simulation, and impedance tube tests for normal sound incidence. Experimental results from 92 tests were compared with theoretical and numerical model results to understand the acoustic effects generated by adding the porous material inside the metamaterial. Overall, the results show a decrease in the maximum sound absorption of the developed hybrid metamaterial, but an increase in the frequency bandwidth for absorption of 50% of sound energy. With this design of coiled cavity acoustic metamaterial and the internal application of porous materials, it is possible to control the frequency bandwidth and maximum sound absorption for noise reduction applications at low frequencies.

**Keywords:** Hybrid Acoustic Metamaterial. Low Frequencies. Porous Material. Sound Absorption. Coiled Spaces.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista microscópica dentre dois tipos de material porosos. . . . .	24
Figura 2 – Ressonador de Helmholtz. . . . .	27
Figura 3 – Ressonador de painel perfurado. . . . .	28
Figura 4 – Parâmetros geométricos cavidade enrolada do MMA. . . . .	32
Figura 5 – Parâmetros do painel com perfuração quadrada. . . . .	33
Figura 6 – Parâmetros painel com perfuração tipo fenda. . . . .	34
Figura 7 – Vista em corte do metamaterial quanto ao posicionamento do material poroso. . . . .	40
Figura 8 – Coeficiente de absorção sonora para variação na resistividade ao fluxo, cavidade $n=2$ com material poroso posição 2. . . . .	42
Figura 9 – Coeficiente de absorção sonora para variação na porosidade, cavidade $n=2$ com material poroso posição 2. . . . .	43
Figura 10 – Coeficiente de absorção sonora para variação na tortuosidade, cavidade $n=2$ com material poroso posição 2. . . . .	43
Figura 11 – Coeficiente de absorção sonora para variação do comprimento característico viscoso, cavidade $n=2$ com material poroso posição 2. . . . .	44
Figura 12 – Coeficiente de absorção sonora para variação do comprimento característico térmico, cavidade $n=2$ com material poroso posição 2. . . . .	45
Figura 13 – Geometria do modelo numérico $n=2$ . . . . .	46
Figura 14 – Comparação tamanhos de malhas. . . . .	48
Figura 15 – Resultados para diferentes refino de malhas com $n=2$ e material poroso incluído na cavidade. . . . .	48
Figura 16 – Modelo complexo apresentando duas perfurações de entrada de diâmetros diferentes. . . . .	49
Figura 17 – Coeficiente de absorção sonora para diferentes tamanhos de malhas com $n=2$ , material poroso incluído na cavidade e modelo complexo. . . . .	50
Figura 18 – Exemplo de modelo numérico completo com todas as cavidades como nas amostras experimentais. . . . .	52
Figura 19 – Bancada de equipamentos necessários para teste experimental em tubo de impedância. . . . .	53
Figura 20 – Tampas de mesmas dimensões . . . . .	56
Figura 21 – Exemplo de amostras utilizadas . . . . .	57
Figura 22 – Bancada com tubo de impedância junto aos microfones utilizados para realização dos testes. . . . .	57
Figura 23 – Comportamento do coeficiente de absorção sonora do metamaterial A210311 (perfuração circular e sem material poroso), da melamina e da lã de PET. . . . .	60

Figura 24 – Comportamento do coeficiente de absorção sonora do metamaterial A210311 (perfuração circular e sem material poroso, valido a partir de 180 Hz) e da melamina nas posições 1 (frontal), 2 (intermediária) e 3 (posterior). . . . .	61
Figura 25 – Desempenho da amostra A110231 (metamaterial com perfuração quadrada e sem material poroso). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	63
Figura 26 – Desempenho da amostra A110231mp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. . . . .	64
Figura 27 – Desempenho da amostra A110231lp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com la de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	65
Figura 28 – Desempenho da amostra A110231 (metamaterial com perfuração quadrada e sem material poroso) em 400 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	67
Figura 29 – Desempenho da amostra A110231mp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 1) em 400 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	67
Figura 30 – Desempenho da amostra A110231lp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 1) em 400 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	68
Figura 31 – Desempenho da amostra A210311 (metamaterial com perfuração circular e sem material poroso). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	70
Figura 32 – Desempenho da amostra A210311mp1 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	71
Figura 33 – Desempenho da amostra A210311lp1 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	72

Figura 34 – Desempenho da amostra A210311mp1 a 450 Hz (metamaterial com circular quadrada e com melamina na posição 1). a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	74
Figura 35 – Desempenho da amostra A210311lp1 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 1) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	74
Figura 36 – Desempenho da amostra A310594 (metamaterial com perfuração fenda e sem material poroso). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	76
Figura 37 – Desempenho da amostra A310594mp1 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	77
Figura 38 – Desempenho da amostra A310594lp1 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	78
Figura 39 – Desempenho da amostra A310594mp1 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 1) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	80
Figura 40 – Desempenho da amostra A310594lp1 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 1) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	80
Figura 41 – Desempenho da amostra A110231mp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 2) . a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	83
Figura 42 – Desempenho da amostra A110231lp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	84
Figura 43 – Desempenho da amostra A110231mp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	86

Figura 44 – Desempenho da amostra A110231lp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	86
Figura 45 – Desempenho da amostra A210311mp2 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	88
Figura 46 – Desempenho da amostra A210311lp2 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	89
Figura 47 – Desempenho da amostra A210311mp2 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ]. . . . .	91
Figura 48 – Comparativo amostra A210311lp2 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].	91
Figura 49 – Desempenho da amostra A310594mp2 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	93
Figura 50 – Desempenho da amostra A310594lp2 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	94
Figura 51 – Desempenho da amostra A310594mp2 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].	95
Figura 52 – Desempenho da amostra A310594lp2 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de pet na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].	96
Figura 53 – Desempenho da amostra I110231mp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 3) . a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	98

Figura 54 – Desempenho da amostra I110231lp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	99
Figura 55 – Desempenho da amostra I110231mp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [Pa]. b) Velocidade acústica instantânea [m/s]. c) Dissipação térmica [W/m <sup>2</sup> ]. . . . .	100
Figura 56 – Desempenho da amostra I110231lp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de pet na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [Pa]. b) Velocidade acústica instantânea [m/s]. c) Dissipação térmica [W/m <sup>2</sup> ].	101
Figura 57 – Desempenho da amostra I210311mp3 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	102
Figura 58 – Desempenho da amostra I210311lp3 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	103
Figura 59 – Desempenho da amostra I210311mp3 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [Pa]. b) Velocidade acústica instantânea [m/s]. c) Dissipação térmica [W/m <sup>2</sup> ]. . . . .	104
Figura 60 – Desempenho da amostra I210311lp3 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [Pa]. b) Velocidade acústica instantânea [m/s]. c) Dissipação térmica [W/m <sup>2</sup> ].	105
Figura 61 – Desempenho da amostra I310594mp3 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	106
Figura 62 – Desempenho da amostra I310594lp3 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	107
Figura 63 – Desempenho da amostra I310594mp3 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [Pa]. b) Velocidade acústica instantânea [m/s]. c) Dissipação térmica [W/m <sup>2</sup> ].	108

Figura 64 – Desempenho da amostra I310594lp3 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].	109
Figura 65 – Desempenho da amostra A110481 (metamaterial com perfuração quadrada). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	117
Figura 66 – Desempenho da amostra A210571 (metamaterial com perfuração circular). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	118
Figura 67 – Desempenho da amostra A310942 (metamaterial com perfuração fenda). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	119
Figura 68 – Desempenho da amostra A110481mp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	120
Figura 69 – Desempenho da amostra A110481lp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	121
Figura 70 – Desempenho da amostra A210571mp1 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	122
Figura 71 – Desempenho da amostra A210571lp1 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	123
Figura 72 – Desempenho da amostra A310942mp1 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	124
Figura 73 – Desempenho da amostra A310942lp1 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	125

Figura 74 – Desempenho da amostra A110481mp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	126
Figura 75 – Desempenho da amostra A110481lp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	127
Figura 76 – Desempenho da amostra A210571mp2 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	128
Figura 77 – Desempenho da amostra A210571lp2 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	129
Figura 78 – Desempenho da amostra A310942mp2 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	130
Figura 79 – Desempenho da amostra A310942lp2 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	131
Figura 80 – Desempenho da amostra A110481mp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	132
Figura 81 – Desempenho da amostra A110481lp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	133
Figura 82 – Desempenho da amostra A210571mp3 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	134

Figura 83 – Desempenho da amostra A210571lp3 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	135
Figura 84 – Desempenho da amostra A310942mp3 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	136
Figura 85 – Desempenho da amostra A310942lp3 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora. . . . .	137



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades análogas entre ondas eletromagnéticas e acústicas. . . . .	29
Tabela 2 – Classificação de componentes de metamateriais. . . . .	30
Tabela 3 – Propriedades e parâmetros da melamina. . . . .	41
Tabela 4 – Comparação entre os diferentes tamanhos de malhas no modelo de única célula. . . . .	47
Tabela 5 – Comparação entre os diferentes tamanhos de malhas no modelo complexo.	50
Tabela 6 – Lógica da nomenclatura das amostras. . . . .	55
Tabela 7 – Dimensões da cavidade utilizada para a construção dos metamateriais.	58
Tabela 8 – Dimensões dos painéis frontais utilizados para a construção dos meta- materiais. . . . .	59
Tabela 9 – Parâmetros macroacústicos da lã de PET e melamina. . . . .	59
Tabela 10 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A110231 (meta- material com perfuração quadrada). . . . .	66
Tabela 11 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A210311 (meta- material com perfuração circular). . . . .	73
Tabela 12 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A310594 (meta- material com perfuração tipo fenda). . . . .	79
Tabela 13 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A110231 (meta- material com perfuração quadrada). . . . .	85
Tabela 14 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A210311 (meta- material com perfuração circular). . . . .	90
Tabela 15 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A310594 (meta- material com perfuração fenda). . . . .	95
Tabela 16 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A110231 (meta- material com perfuração quadrada). . . . .	100
Tabela 17 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A210311 (meta- material com perfuração circular). . . . .	104
Tabela 18 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A310594 (meta- material com perfuração fenda). . . . .	108

## SUMÁRIO

	<b>Sumário</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>20</b>
1.1	OBJETIVOS . . . . .	21
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> . . . . .	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>23</b>
2.1	ABSORVEDORES ACÚSTICOS . . . . .	23
<b>2.1.1</b>	<b>Materiais porosos</b> . . . . .	<b>23</b>
2.1.1.1	Parâmetros acústicos macroscópicos de materiais porosos . . . . .	24
2.1.1.1.1	<i>Resistividade ao fluxo</i> . . . . .	24
2.1.1.1.2	<i>Porosidade</i> . . . . .	25
2.1.1.1.3	<i>Tortuosidade</i> . . . . .	25
2.1.1.1.4	<i>Comprimento característico viscoso <math>\Lambda</math></i> . . . . .	25
2.1.1.1.5	<i>Comprimento característico térmico <math>\Lambda'</math></i> . . . . .	26
<b>2.1.2</b>	<b>Ressonadores acústicos</b> . . . . .	<b>26</b>
2.1.2.1	Ressonador de Helmholtz . . . . .	26
2.1.2.2	Painel perfurado . . . . .	27
2.2	METAMATERIAIS . . . . .	28
<b>2.2.1</b>	<b>Metamaterial acústico</b> . . . . .	<b>29</b>
2.3	MODELO ANALÍTICO DE METAMATERIAL . . . . .	30
<b>2.3.1</b>	<b>Absorção sonora</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Cavidade</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Perfuração circular</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Perfuração quadrada</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Perfuração fenda</b> . . . . .	<b>34</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Modelo material poroso</b> . . . . .	<b>35</b>
2.3.6.1	Impedância acústica de superfície . . . . .	36
2.3.6.2	Coeficientes de reflexão e absorção sonora . . . . .	37
2.3.6.3	Modelo Johnson - Champoux - Allard - Lafarge (JCAL) . . . . .	37
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>39</b>
3.1	MODELO ANALÍTICO DO METAMATERIAL HÍBRIDO (COM MATERIAL POROSO NA CAVIDADE INTERNA) . . . . .	39
<b>3.1.1</b>	<b>Análise de influência do modelo analítico aos parâmetros do material poroso</b> . . . . .	<b>40</b>
3.1.1.1	Resistividade ao fluxo ( $\sigma_{r,f}$ ) . . . . .	41
3.1.1.2	Porosidade ( $\phi$ ) . . . . .	42
3.1.1.3	Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) . . . . .	42

3.1.1.4	Comprimento característico viscoso ( $\Lambda$ ) . . . . .	43
3.1.1.5	Comprimento característico térmico ( $\Lambda'$ ) . . . . .	44
3.2	ANÁLISE NUMÉRICA DO METAMATERIAL HÍBRIDO (COM MATERIAL POROSO NA CAVIDADE INTERNA) . . . . .	45
<b>3.2.1</b>	<b>Modelo individual (célula unitária do metamaterial híbrido)</b> . . . . .	<b>47</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Modelo complexo (com mais de um tipo de célula do metamaterial híbrido)</b> . . . . .	<b>49</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Modelo completo do metamaterial labiríntico com material poroso</b>	<b>51</b>
3.3	ENSAIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA . . . . .	52
<b>3.3.1</b>	<b>Escolha das amostras</b> . . . . .	<b>54</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Ensaio no tubo de impedância</b> . . . . .	<b>55</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>58</b>
4.1	ABSORÇÃO SONORA DOS MATERIAIS POROSOS NAS CAVIDADES DO METAMATERIAL . . . . .	58
4.2	ABSORÇÃO SONORA E POSIÇÕES DO MATERIAL POROSO NAS CAVIDADES DO METAMATERIAL . . . . .	59
<b>4.2.1</b>	<b>Material poroso na Posição 1 (frontal)</b> . . . . .	<b>61</b>
4.2.1.1	Amostra A110231 (Perfuração quadrada) . . . . .	61
4.2.1.2	Amostra A210311 (Perfuração circular) . . . . .	68
4.2.1.3	Amostra A310594 (Perfuração fenda) . . . . .	75
4.2.1.4	Síntese preliminar sobre o material poroso na posição 1 (frontal) . . . . .	81
<b>4.2.2</b>	<b>Análise dos resultados na Posição 2 (intermediária)</b> . . . . .	<b>81</b>
4.2.2.1	Amostra A110231 (Perfuração quadrada) . . . . .	82
4.2.2.2	Amostra A210311 (Perfuração circular) . . . . .	87
4.2.2.3	Amostra A310594 (Perfuração fenda) . . . . .	92
4.2.2.4	Síntese preliminar sobre o material poroso na posição 2 (intermediária) . . . . .	96
<b>4.2.3</b>	<b>Análise dos resultados na Posição 3 (posterior)</b> . . . . .	<b>97</b>
4.2.3.1	Amostra A110231 (Perfuração quadrada) . . . . .	97
4.2.3.2	Amostra A210311 (Perfuração circular) . . . . .	101
4.2.3.3	Amostra A310594 (Perfuração fenda) . . . . .	105
4.2.3.4	Síntese preliminar sobre o material poroso na posição 3 (posterior) . . . . .	109
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>110</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	111
	<b>APÊNDICE A – CURVAS DE DESEMPENHO ACÚSTICO DOS METAMATERIAIS SEM MATERIAL POROSO</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICE B – CURVAS DE DESEMPENHO ACÚSTICO DOS METAMATERIAIS COM MATERIAL POROSO NA POSIÇÃO 1 (FRONTAL)</b> . . . . .	<b>120</b>

<b>APÊNDICE C – CURVAS DE DESEMPENHO ACÚSTICO DOS METAMATERIAIS COM MATERIAL POROSO NA POSIÇÃO 2 (INTERMEDIÁRIA) . . . . .</b>	<b>126</b>
<b>APÊNDICE D – CURVAS DE DESEMPENHO ACÚSTICO DOS METAMATERIAIS COM MATERIAL POROSO NA POSIÇÃO 3 (POSTERIOR) . . . . .</b>	<b>132</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O controle da energia sonora é essencial para reduzir os efeitos negativos causados por ruídos e vibrações na saúde humana. Esses problemas geralmente resultam da exposição prolongada a níveis sonoros não aceitáveis, o que pode ocasionar problemas auditivos e não auditivos (OMS, 2018). A qualidade deficiente no tratamento acústico de ambientes pode levar a várias consequências prejudiciais aos usuários, tais como a falta de inteligibilidade da fala e a propagação de ruídos desagradáveis ou excessivamente altos em ambientes de trabalho, entre outros problemas que afetam o conforto humano (OMS, 2018; Egan, 2007).

Para o controle acústico em ambientes, o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) é um parâmetro fundamental para avaliar a eficácia da dissipação de energia sonora por um material. Ele é definido como a razão entre a energia sonora absorvida e a energia sonora incidente (Basu, 2018).

Os materiais mais comuns utilizados em tratamentos acústicos são materiais porosos (celular, fibroso ou granular). No entanto, pesquisas contínuas têm buscado desenvolver novos e melhores materiais acústicos para aprimorar o conforto acústico e o controle de ruídos e vibrações. Materiais porosos têm sido amplamente utilizados em sistemas de multicamadas ou de forma isolada para o controle de ruídos e vibrações em salas, veículos e aeronaves. Eles podem ser empregados para absorção de ruídos aéreos e para otimizar o amortecimento e a perda de transmissão em estruturas (Balvedi, 1998). No entanto, esses materiais apresentam limitações quando se trata de eficácia em baixas frequências, especialmente quando as dimensões são menores que o comprimento de onda (Wang *et al.*, 2018).

Uma alternativa aos materiais acústicos tradicionais já utilizados a anos para tratamento acústico de ambientes são os metamateriais, que podem ser considerados materiais desenvolvidos com a intenção de absorver energia acústica em determinadas faixas de frequências variando conforme as dimensões e características de cada um.

As técnicas e equipamentos utilizados na fabricação das pequenas unidades constituintes dos metamateriais ainda apresentam custos elevados, incluindo técnicas de micro e nanomanufatura que estão em constante desenvolvimento (Pai; Huang, 2015). Desde então, várias pesquisas na área de materiais vêm sendo realizadas, sendo explorado diferentes métodos de fabricação, modelos inovadores de metamateriais e aplicando diversas técnicas de controle de energia sonora para aprimorar a utilização prática dos metamateriais. Para ampliar o uso de metamateriais em aplicações práticas, pesquisadores como Ji *et al.* (2019) têm explorado a combinação de metamateriais labirínticos com materiais porosos internos, substituição de um volume para aumentar a largura de banda de absorção e perda de transmissão, com foco em frequências entre 1.000 e 3.000 Hz, faixa na qual a audição humana é mais sensível. Zhang e Xin (2023) adotaram a ideia de metamaterial de

espaço enrolado e adicionaram uma camada de material poroso nas paredes internas para a absorção da energia sonora e aumentar a banda de absorção em frequências mais baixas, entre 200 e 600 Hz. Seus resultados apresentaram bandas de absorção de 50%, variando de 72 a 381 Hz, de acordo com o design do metamaterial labiríntico.

Lee, Nomura e Iizuka (2019) demonstraram a utilização de absorvedores porosos em conjunto com ressonadores para ampliar a faixa de frequência com 50% de absorção em três tipos construtivos de ressonadores. Obtiveram resultados para a faixa de frequência variando de 0,44 vezes a frequência de ressonância até 1,28 vezes a frequência de ressonância, novamente dependendo do design utilizado.

Cassetari (2023) utilizou a ideia do corte a laser para a construção de metamateriais labirínticos de baixo custo, fácil e rápida produção usando como matéria prima MDF e acrílico. Os resultados apresentados apontam para uma boa confiabilidade desse tipo de processo quando configurado corretamente, com uma margem de tolerância de 10 Hz na frequência central do pico de absorção para mais ou para menos do projetado.

Apesar do progresso, existem desafios a serem superados para que os MMA (Metamateriais acústicos) tenham uma banda de absorção sonora mais ampla e sejam altamente eficazes, ao mesmo tempo que se utilizam materiais de menor custo financeiro e técnicas de fabricação econômicas.

Nesse contexto e seguindo as sugestões de trabalhos futuros indicadas por Cassetari (2023), este trabalho tem como objetivo explorar a combinação de materiais acústicos tradicionais, como melamina e lã de PET, com metamateriais de baixo custo confeccionados pela técnica de corte a laser e em MDF. O objetivo é aprimorar as principais características dos metamateriais e ampliar a faixa de absorção sonora quando é inserido esse material acústico tradicional nas cavidades labirínticas internas, o que resulta em mais oportunidades de aplicação para a redução de energia sonora em frequências abaixo de 600 Hz.

## 1.1 OBJETIVOS

A seguir estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho de dissertação de mestrado.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa consiste em desenvolver propostas de projeto de um absorvedor acústico duplo e ajustável (AADA), ou seja, um metamaterial composto por um painel com perfuração variável acoplado a uma cavidade labiríntica na qual uma camada do material poroso é adicionada afim de obter um controle efetivo nas baixas frequências.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar o modelo físico-matemático do metamaterial acústico duplo e ajustável que permita descrever o comportamento da absorção sonora para incidência normal;
- Avaliar o desempenho acústico do absorvedor acústico duplo e ajustável confeccionado com diferentes materiais de fabricação do metamaterial e do material poroso (melamina e lã de PET);
- Analisar e comparar o absorvedor acústico duplo e ajustável por meio de ensaios em tubo de impedância, por simulação computacional e modelos analíticos;
- Caracterizar o desempenho acústico e a influência dos materiais poroso (melamina e lã de PET) a partir das propriedades acústicas para maximizar o coeficiente de absorção sonora nas médias e altas frequências;
- Propor absorvedores acústicos duplos e ajustáveis com adequada eficiência numa faixa ampla de frequências e controlando as frequências de pico, amplitude de absorção sonora e largura de banda.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo trata de uma breve fundamentação teórica utilizada para o entendimento e realização deste trabalho de pesquisa sobre metamateriais acústicos e absorvedores porosos.

### 2.1 ABSORVEDORES ACÚSTICOS

Esta seção apresenta uma revisão de alguns tipos de absorvedores acústicos, suas características, mecanismos de funcionamento e possíveis aplicações. Geralmente, os absorvedores sonoros podem ser classificados em um dos seguintes tipos: absorvedores porosos, absorvedores de painel de membrana e absorvedores ressonantes. Todos esses tipos de absorvedores funcionam fundamentalmente da mesma maneira.

O som consiste na energia vibratória das partículas de ar, e por meio desses absorvedores, essa energia vibratória pode ser dissipada na forma de calor (Everest e Pohlmann, 2009). Os dispositivos abordados aqui, sejam eles materiais porosos ou absorvedores ressonantes, têm como principal método de absorção sonora a transformação da energia sonora em outras formas de energia por meio de fenômenos físicos.

#### 2.1.1 Materiais porosos

Para os absorventes porosos mais comuns, as perdas devidas à vibração do material são geralmente de menor importância do que as de dissipação quando a onda sonora se move pelo ar contido nos poros (Cox e D'Antonio, 2017).

Quando excitado por uma onda incidente, as moléculas de ar nos poros do material poroso são forçadas a oscilar. A proximidade do entorno sólido significa que as oscilações resultam em perdas devido ao atrito (Vér e Beranek, 2006).

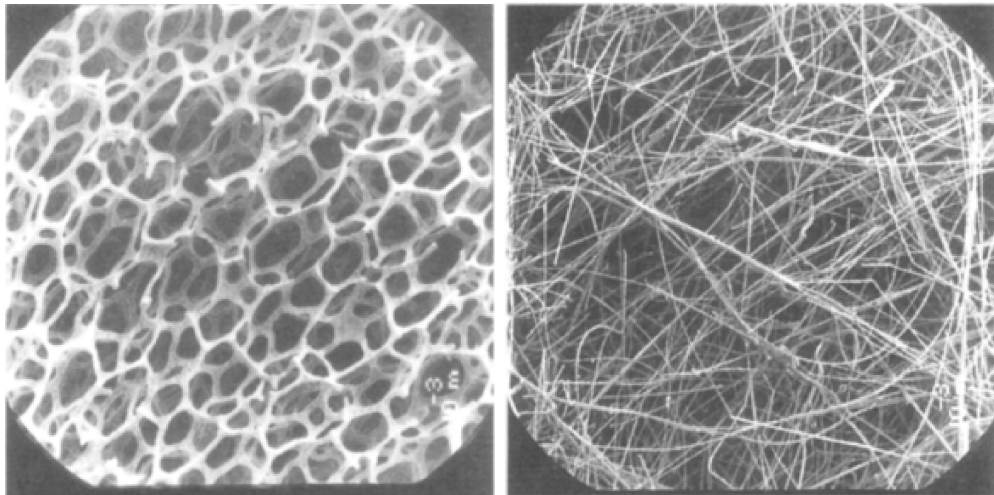
Também ocorre uma perda de momento devido à mudança no fluxo à medida que as ondas sonoras se propagam pelos poros irregulares. A camada limite do ar, nas frequências audíveis, tem tamanho submilimétrico, e conseqüentemente, perdas viscosas ocorrem em uma pequena camada de ar adjacente à parede do poro. Além dos efeitos viscosos, há perdas devido à condução térmica do ar para o material absorvente (Cox e D'Antonio, 2017).

Há também outros detalhes relacionados à classificação dos materiais acústicos porosos. Parte do volume total desses materiais é ocupada pelo fluido, encapsulada pela estrutura do material. Se os compartimentos onde o fluido se encontra estão interligados internamente e possuem uma abertura externa, eles são chamados de materiais de porosidade aberta. Caso contrário, se os poros não forem interligados, eles são chamados de materiais de porosidade fechada. Na Figura 1, podem ser observadas as características de dois tipos de materiais. No lado esquerdo da figura há um material poroso de , e no lado



direito um material fibroso.

Figura 1 – Vista microscópica dentre dois tipos de material porosos.



Fonte: Adaptado de Fahy (2001).

Outra característica que pode ser considerada para classificar esses materiais é a parte sólida. Se não houver movimento significativo em comparação com a fase fluida, considera-se o material de estrutura rígida. A partir disso, encontram-se as características de dissipação de energia sonora mencionadas anteriormente.

#### 2.1.1.1 Parâmetros acústicos macroscópicos de materiais porosos

Segundo Fahy (2001), é impossível prever o comportamento da maioria dos materiais absorvedores de som baseado puramente em modelos teóricos, principalmente devido à complexidade geométrica e estrutural que esses materiais apresentam.

A interação de uma onda sonora com a estrutura do material poroso deve ser descrita por meio de parâmetros determinados experimentalmente, como resistência ao fluxo, porosidade e outros parâmetros usados para representar o material (Ingard, 2010). A seguir, será apresentada uma breve descrição desses parâmetros.

##### 2.1.1.1.1 Resistividade ao fluxo

A resistividade ao fluxo é a medida de quão facilmente o ar pode penetrar em um absorvedor poroso e a resistência que o fluxo de ar encontra através da estrutura (Cox e D'Antonio, 2017).

Em todas as formas de materiais absorvedores porosos, as forças do fluido viscoso predominam sobre as forças inerciais nas frequências mais baixas de interesse para o controle de ruído, tipicamente de 20 a algumas centenas de Hertz (Fahy, 2001).

A expressão para a resistência ao fluxo pode ser dada pela Equação 1 com unidade de medida em  $Pa.s/m^2$ .

$$\sigma_r = \frac{(P_2 - P_1)S_a}{hQ}, (1)$$

$P_2 - P_1$  representa a diferença de pressão entre as faces do material em pascals ( $Pa$ ),  $S_a$  é a área da seção transversal da amostra em metros quadrados ( $m^2$ ),  $h$  é a espessura do material em metros ( $m$ ) e  $Q$  é a vazão volumétrica do fluxo de ar, medida em metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ).

#### 2.1.1.1.2 Porosidade

Porosidade é a razão do volume dos poros pelo volume total do absorvedor. Bons absorvedores tendem a ter alta porosidade; por exemplo, a maioria das lãs minerais tem uma porosidade de 0,98. Quando é determinada a porosidade de um material, os poros fechados não devem ser incluídos no volume total dos poros, uma vez que esses são inacessíveis às ondas sonoras (Cox e D'Antonio, 2017).

A Equação 2 representa a porosidade e o resultado é expresso em porcentagem:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t}, (2)$$

Sendo  $V_p$  e  $V_t$  os volumes dos poros e total, respectivamente.

#### 2.1.1.1.3 Tortuosidade

A tortuosidade de um sólido poroso é a medida da irregularidade dos caminhos preenchidos por fluido através da matriz sólida. Ela está relacionada ao fator de forma usado para descrever a condutividade elétrica de um sólido poroso saturado com um fluido condutor (Vér e Berenek, 2007).

A tortuosidade é definida por Johnson *et al.* (1987) como a razão da velocidade macroscópica de propagação em um ponto  $M$  ( $v_m$ ), calculada a partir de uma média quadrática, pela velocidade macroscópica ( $v(M_0)$ ) ao quadrado. Esta última é obtida pela média das velocidades  $v(M)$  através de um elemento de volume  $V$  em  $M_0$ . A equação é apresentada a seguir:

$$\alpha_\infty = \frac{\langle v_m^2(M) \rangle_V}{v^2(M_0)}, (3)$$

#### 2.1.1.1.4 Comprimento característico viscoso $\Lambda$

O comprimento característico viscoso, conforme definido por Johnson, Koplik e Schwartz (1986), é uma adaptação que leva em consideração os efeitos visco-térmicos em altas frequências, descrevendo a contribuição da dissipação de energia devido aos efeitos viscosos.

O comprimento característico viscoso  $\Lambda$  é descrito pela Equação 4, e sua unidade de medida é em metros ( $m$ ).

$$\Lambda = 2 \frac{\int_V |\mathbf{v}(r)|^2 dV}{\int_A |\mathbf{v}(r_w)|^2 dA}, (4)$$

A integral no numerador é realizada sobre o volume dos poros, denotado por  $V$ , onde  $\mathbf{v}(r)$  representa a velocidade microscópica do fluido nos poros. A integral no denominador é realizada sobre a superfície das paredes, representada por  $A$ , onde  $\mathbf{v}(r_w)$  é a velocidade do fluido viscoso na superfície das paredes (Champoux e Allard, 1991).

#### 2.1.1.1.5 Comprimento característico térmico $\Lambda'$

Definido de forma análoga ao comprimento característico viscoso por Champoux e Allard (1991), o comprimento característico térmico  $\Lambda'$  representa o raio hidráulico médio dos maiores poros, onde ocorre o maior fluxo de calor entre o fluido e a estrutura.

O parâmetro é expresso pela Equação 5, com unidade de medida em metros ( $m$ ). No numerador, a integral é realizada sobre o volume do poro, denotado por  $V$ , e no denominador, é realizada sobre a área da superfície do poro, representada por  $A$  (Champoux e Allard, 1991).

$$\Lambda' = 2 \frac{\int_V dV}{\int_A dA}, (5)$$

### 2.1.2 Ressonadores acústicos

Utilizando ressonâncias, é possível obter absorção em baixas e médias frequências. Isso ocorre devido à ineficiência do uso de absorvedores porosos nessas faixas de frequência, devido à espessura necessária do material (Cox e D'Antonio, 2017). A característica geral dos absorvedores ressonantes é apresentar um pico de absorção, o que pode limitar a obtenção de uma banda larga de absorção, como é possível em materiais porosos (Cox e D'Antonio, 2017).

Geralmente, as dimensões de um ressonador são consideradas grandes em comparação com a espessura da camada limite visco-térmica e pequenas quando comparadas ao comprimento de onda da onda incidente (Ingard, 2009). Devido a essas características, os absorvedores ressonantes têm uma ampla gama de aplicações. Neste capítulo, serão apresentados sucintamente os tipos de ressonadores mais comumente utilizados para absorção sonora e suas características.

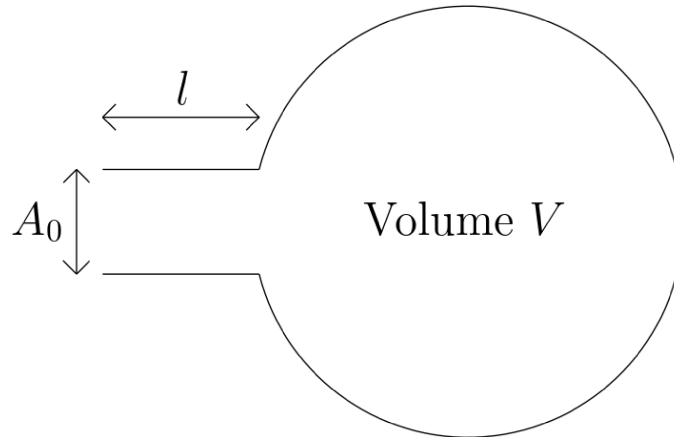
#### 2.1.2.1 Ressonador de Helmholtz

No ressonador de Helmholtz, as energias cinéticas e potenciais podem ser consideradas separadas espacialmente, com a energia cinética localizada no pescoço do ressonador

e a energia potencial na cavidade (Ingard, 2009).

A Figura 2 representa um ressonador de Helmholtz genérico, onde a cavidade possui um volume  $V$ , o pescoço tem um comprimento  $l$  e a abertura tem uma área  $A_0$ .

Figura 2 – Ressonador de Helmholtz.



Fonte: Adaptado de Ingard (2009).

Esse tipo de absorvedor pode ser representado como um sistema massa-mola, onde a massa corresponde ao ar presente no pescoço do ressonador e a mola representa o ar na cavidade. Conforme explicado por Ingard (2009), a frequência de ressonância de um ressonador de Helmholtz pode ser calculada por meio da seguinte fórmula:

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{A_0}{V(l + \Delta l)}}, (6)$$

Nessa equação,  $c_0$  representa a velocidade do som,  $A_0$  é a área da seção transversal da abertura,  $V$  é o volume da cavidade,  $l$  é o comprimento do pescoço e  $\Delta l$  é um fator de correção dependente do tipo de pescoço (Ingard, 2009).

Essa expressão é válida para qualquer formato da cavidade, desde que o tamanho da cavidade seja muito menor que o comprimento de onda.

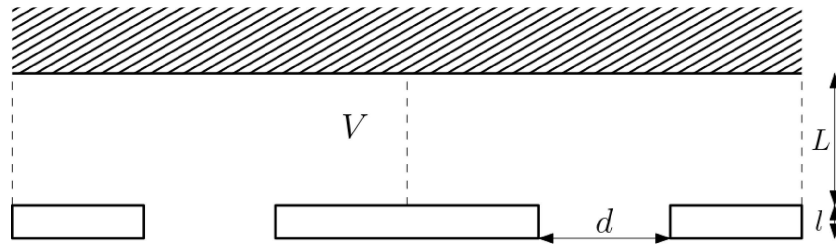
### 2.1.2.2 Painel perfurado

Um absorvedor com painel perfurado pode ser considerado como várias células, cada uma com uma perfuração central, o que torna o comportamento individual de cada célula semelhante ao de um ressonador de Helmholtz. A Figura 3 representa a construção típica de um painel perfurado.

Normalmente, esse tipo de absorvedor é utilizado com uma camada de material poroso no seu interior para aumentar a largura da banda de absorção. No entanto, também pode ser usado sem a camada porosa para controlar modos ou grupos de modos de forma isolada, sem afetar significativamente a acústica geral da sala (Everest e Pohlmann, 2009).

A frequência de ressonância de um absorvedor desse tipo pode ser calculada usando a seguinte equação (Equação 7):

Figura 3 – Ressonador de painel perfurado.



Fonte: Adaptado de Jacobsen *et al.* (2011).

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(l + \delta)}}, \quad (7)$$

Onde  $P$  é o grau de perfuração do painel,  $L$  é a profundidade da cavidade,  $l$  é a espessura do painel, que serve como o tamanho do pescoço de um ressonador, e  $\delta$  é o fator de correção para o pescoço (Jacobsen *et al.*, 2011).

Além dos painéis perfurados, existe uma categoria chamada de "microperfurados". Eles operam com o mesmo princípio, mas apresentam características de absorção devido às perdas causadas pela alta viscosidade do ar ao passar pelos furos, que são um pouco maiores que a camada limite. Isso elimina a necessidade de usar materiais porosos para ampliar a banda de absorção (Cox e D'Antonio, 2017).

## 2.2 METAMATERIAIS

Em 1967, o físico russo Victor Veselago publicou os primeiros trabalhos sobre materiais canhotos (left-handed medium - LHM), que são materiais com índice de refração negativo. No entanto, essas descobertas não foram amplamente exploradas por décadas até que Pendry e seus colegas propuseram materiais com permissividade ( $\epsilon$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ) efetivas negativas em 1996 (Pendry *et al.*, 1996 ; Craster; Guenneau, 2013).

Após essas publicações, surgiu o termo "metamaterial" para descrever materiais compostos nos quais é possível manipular as características construtivas para alterar as propriedades de dispersão de ondas. Os metamateriais acústicos (MMA) mantêm a característica de ressonância local e, mesmo que sejam frequentemente construídos como estruturas periódicas, suas propriedades não dependem dessa periodicidade (Deymier, 2013).

Metamateriais acústicos e cristais fonônicos são materiais artificiais desenvolvidos para possuírem propriedades que permitem manipular e controlar as características de ondas. Os metamateriais acústicos podem ser criados por meio da construção de subunidades em uma disposição periódica, capazes de manipular as propriedades necessárias para alcançar os resultados desejados. Geralmente, esses metamateriais apresentam uma banda de frequência específica devido à presença de ressonadores, e seu tamanho é muito menor do que o comprimento de onda nas frequências de interesse (Pai e Huang, 2015).

De acordo com Cui, Smith e Liu (2010), um metamaterial pode ser definido como um compósito macroscópico com uma estrutura periódica ou não periódica, cuja função é o resultado da combinação da arquitetura celular e da composição química.

Com base nessas informações, este capítulo apresentará um breve histórico dos metamateriais, com foco nos metamateriais eletromagnéticos, que foram os primeiros a serem propostos por Veselago (1968), e nos metamateriais acústicos de interesse e utilizados para a elaboração desta dissertação.

### 2.2.1 Metamaterial acústico

Metamateriais acústicos são estruturas compostas por materiais artificiais, cujas propriedades acústicas são distintas das dos materiais convencionais utilizados na sua construção (Romero-Garcia; Hladky-Hennion, 2019).

Essa categoria de metamateriais é uma derivação dos estudos sobre metamateriais eletromagnéticos, uma vez que as ondas eletromagnéticas e as ondas acústicas compartilham características semelhantes. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades análogas entre as ondas eletromagnéticas e acústicas.

Tabela 1 – Propriedades análogas entre ondas eletromagnéticas e acústicas.

Eletromagnética	Acústica
Permeabilidade magnética - $\mu$	Densidade dinâmica - $\rho_d$
Permissividade elétrica - $\epsilon$	Compressibilidade dinâmica - $\beta_d$
Campo elétrico - $\vec{E}$	Pressão acústica - $P$
Campo magnético - $\vec{B}$	Velocidade de partícula - $\vec{v}$

Fonte: Adaptado de Almeida (2019).

Liu *et al.* (2000) motivou diversos autores com seu trabalho sobre metamateriais acústicos, levando-os a explorar novas soluções baseadas nesse tipo de construto. Isso permitiu o desenvolvimento de estruturas capazes de alta perda de transmissão e absorção sonora em baixas frequências próximas ao valor máximo (Gan, 2018; Hussein; Leamy; Ruzzene, 2014).

Metamateriais acústicos são geralmente desenvolvidos para aplicações em duas áreas principais. A primeira é a absorção sonora, que consiste em dissipar a energia acústica incidente no material. A segunda é a perda de transmissão (PT), na qual o material deve impedir a transmissão da energia sonora de uma face para a outra. Esses materiais são projetados para operar em faixas de frequência muito específicas, pois dependem das ressonâncias locais ao longo da estrutura. A eficiência dos metamateriais em baixas frequências, quando comparada a materiais tradicionais, pode ser explicada pelos índices negativos de massa efetiva de módulo de volume efetivo presentes nessas estruturas (Deymier, 2013; Romero-Garcia; Hladky-Hennion, 2019; Lovelock, 2014).

Na tabela 2 apresentada a seguir estão descritas as principais classes de metamateriais atualmente em estudo e os objetivos quando usadas em um absorvedor. A partir dessas

Tabela 2 – Classificação de componentes de metamateriais.

Estrutura	Uso	Descrição
Placa	Perda de transmissão	Estruturas periódicas formadas por uma ou mais chapas acopladas a elementos com massa e rigidez distintos, gerando ressonâncias locais.
Membrana	Perda de transmissão	Membrana tensionada, geralmente com espessura menor de 1 mm, com uma ou diversas massas heterogêneas anexadas agindo como ressonadores e com as bordas exterior fixas em uma estrutura rígida.
Ressonador	Perda de transmissão/absorção	Painel plano composto por uma distribuição periódica de fendas. Cada fenda ligada a um conjunto de ressonadores de Helmholtz, sintonizados em frequências distintas.
Espaço enrolado	Absorção	Estrutura compacta com comprimento interno efetivo maior que a espessura, assim aumentando o desempenho acústico em frequências baixas. Normalmente menores que um quarto do comprimento de onda.

Fonte: Adaptado de Cassetari (2023).

classes, é possível desenvolver inúmeras estruturas visando melhorias no desempenho, especialmente direcionadas a faixas de frequências específicas.

### 2.3 MODELO ANALÍTICO DE METAMATERIAL

O modelo de absorvedor acústico utilizado neste trabalho foi proposto por Wang *et al.* (2018). No trabalho deles, é adotado um design composto por uma cavidade de espaço enrolado e microperfuração do tipo circular. Apesar da robustez da análise analítica apresentada pelos autores, eles não exploram o uso de diferentes perfis de perfuração nem a introdução de materiais absorvedores internos para caracterizar os efeitos dessas modificações.

Além do modelo utilizado para o metamaterial, também é aplicado o modelo para o material poroso a ser inserido na cavidade. Nesse caso, o modelo analítico escolhido para descrever o comportamento do material poroso é o de Johnson - Champoux - Allard - Lafarge (JCAL), publicado por Lafarge *et al.* em 1997 como uma melhoria ao modelo analítico de Johnson - Champoux - Allard (JCA) proposto por Champoux e Allard em seu trabalho de 1991.

Zhang e Xin (2023) empregam um método de soma de impedância superficial para a aplicação de materiais porosos na parede interna do espaço enrolado, baseado em camadas. Esta técnica é fundamentada em um trabalho de Liu, Yu e Xin (2021), onde eles dividem um cone de material absorvente em camadas equivalentes no modelo analítico desenvolvido.

Dessa forma, a técnica de camadas será adotada para o desenvolvimento do modelo de impedância superficial do espaço enrolado em conjunto com o material poroso. Nas

seções seguintes, detalham-se as equações fundamentais de cada componente do metamaterial em estudo.

### 2.3.1 Absorção sonora

A impedância total ( $\tilde{Z}_s$ ) de um metamaterial acústico pode ser calculada pela soma da impedância da cavidade enrolada ( $\tilde{Z}_c$ ), que depende das dimensões dos espaços internos, com a impedância do painel perfurado ( $\tilde{Z}_p$ ), a qual tem dependência do tipo e das dimensões da perfuração. Essa relação é apresentada na Equação 8 (Liu *et al.*, 2020).

$$\tilde{Z}_s = \tilde{Z}_p + \tilde{Z}_c \quad (8)$$

A partir da impedância total  $\tilde{Z}_s$  é possível determinar o coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) utilizando a Equação 9,

$$\alpha = 1 - \left| \frac{\tilde{Z}_s/Z_0 - 1}{\tilde{Z}_s/Z_0 + 1} \right|^2, \quad (9)$$

em que  $Z_0$  representa a impedância acústica do ar nas condições aplicadas (Wang *et al.*, 2018).

### 2.3.2 Cavidade

A impedância acústica do espaço enrolado  $\tilde{Z}_c$  é calculada a partir da Equação 10 a seguir,

$$\tilde{Z}_c = -j \frac{S_0}{S_1} \tilde{Z}_e^c \cot(\tilde{k}_{eq} L_{ef}), \quad (10)$$

onde  $S_0 = mL$  e  $S_1 = aw$  são as seções da área transversal da célula e do espaço enrolado, respectivamente.  $L_{ef}$  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 geométricos do modelo estão detalhados na Figura 4 (Wang *et al.*, 2018).

Para a cavidade  $\tilde{Z}_e^c$  representa a impedância característica, dado por  $\tilde{Z}_e^c = \sqrt{\tilde{\rho}_{eq}/\tilde{C}_{eq}}$ , seguindo o modelo teórico de dissipação visco-térmica proposto por Stinson (1991) é possível determinar a densidade complexa  $\tilde{\rho}_{eq}$  a partir da Equação 11 e o módulo de compressibilidade a partir da Equação 12 apresentadas na sequência.

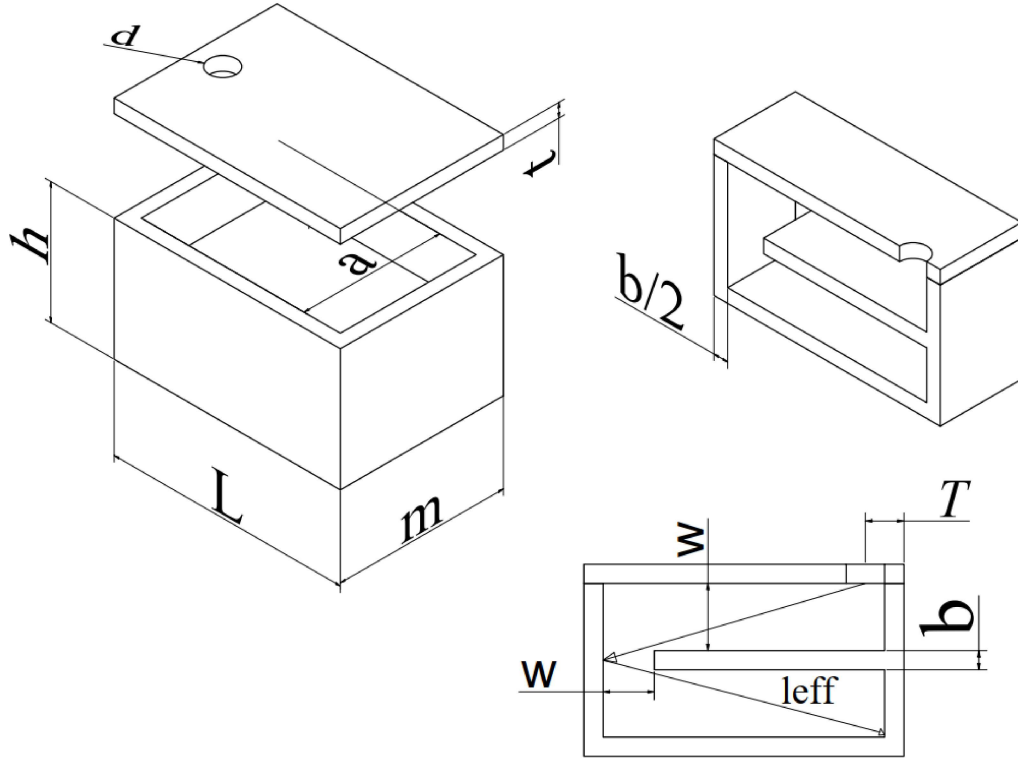
$$\tilde{\rho}_{eq} = \rho_0 \frac{\nu a^2 w^2}{4jw} \times \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \alpha_k^2 \beta_n^2 \times \left( \alpha_k^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega}{\nu} \right) \right]^{-1} \right]^{-1}; \quad (11)$$

$$\tilde{C}_{eq} = \frac{1}{P_0} \left\{ 1 - \frac{4j\omega(\gamma - 1)}{\nu' a^2 w^2} \times \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \alpha_k^2 \beta_n^2 \left( \alpha_k^2 + \beta_n^2 + \frac{j\omega\gamma}{\nu'} \right) \right]^{-1} \right\}; \quad (12)$$

sendo  $P_0$  e  $\gamma$  a pressão do ar e a razão de calor específico, respectivamente.  $\alpha_k = (k + 1/2)\pi/a$  e  $\beta_n = (k + 1/2)\pi/w$  são constantes, e por fim, os parâmetros  $\nu = \mu_{ar}/\rho_0 e \nu'$



Figura 4 – Parâmetros geométricos cavidade enrolada do MMA.



Fonte: Adaptado de Wang *et al.*, 2018.

e  $\nu' = \kappa/\rho_0 C_v$  são calculados a partir da viscosidade do ar ( $\mu_{(ar)}$ ), condutividade elétrica ( $\kappa$ ) e o calor específico a volume constante ( $C_v$ ) (Wang *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020).

### 2.3.3 Perfuração circular

Também conhecido como o modelo de painel perfurado, Wang *et al.* (2018) baseiam-se na teoria de Crandall (1926) para derivar uma solução para o painel perfurado com um orifício circular, conforme apresentado na Equação 13 a seguir,

$$\tilde{Z}_p = \frac{j\omega\rho_0 t}{\Theta} \left[ 1 - \frac{2J_1(\Gamma\sqrt{-j})}{\Gamma\sqrt{-j}J_0(\Gamma\sqrt{-j})} \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2}\eta\Gamma}{\Theta d} + \frac{j0,85\omega\rho_0 d}{\Theta F(\varepsilon)}, \quad (13)$$

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

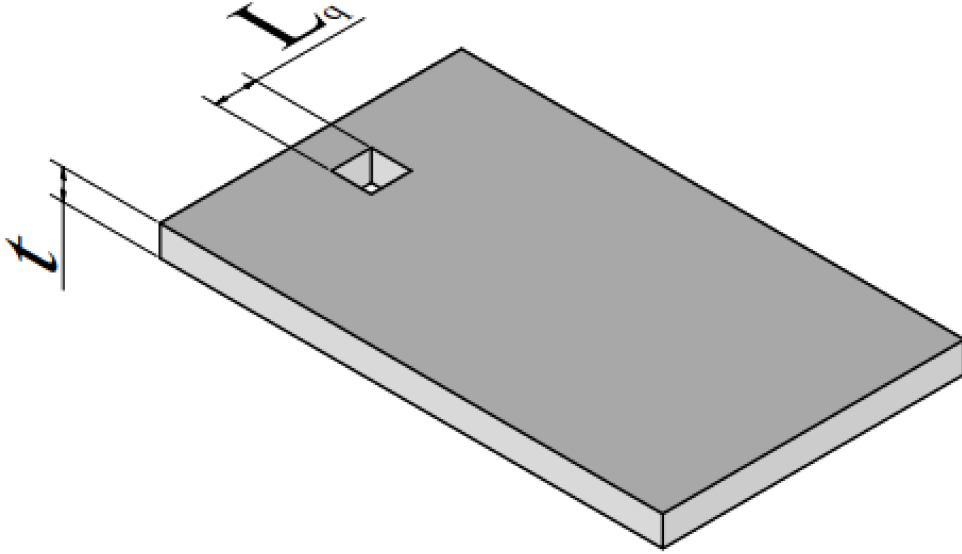
### 2.3.4 Perfuração quadrada

O painel com perfuração quadrada é ilustrada na Figura 5, que apresenta a geometria e a simbologia das dimensões utilizadas. O cálculo da impedância do painel com perfuração quadrada segue o trabalho de Okuzono, Nitta e Sakagami (2019). A Equação

14 representa matematicamente o termo da impedância para esse tipo de painel perfurado, com alguns tratamentos para correção de efeitos da superfície, onde  $t$  é a espessura do painel e  $\varepsilon$  é a proporção da perfuração.

$$\tilde{Z}_t = \frac{j\omega\tilde{\rho}_e t}{\varepsilon} + \frac{\alpha 2R_s}{\varepsilon} + \frac{j\omega\rho_0\delta}{\varepsilon}, (14)$$

Figura 5 – Parâmetros do painel com perfuração quadrada.



Fonte: O Autor.

O primeiro termo da Equação 14 representa as perdas viscosas que ocorrem no interior da perfuração. O segundo termo é devido aos efeitos resistivos, onde  $R_s = \sqrt{2\eta\rho_0\omega}/2$  representa a resistência da superfície. Finalmente, o terceiro termo é a parte reativa e a correção pelo fator  $\delta$  devido ao efeito da massa de ar contida na perfuração.

A densidade efetiva complexa dentro da perfuração ( $\tilde{\rho}_e$ ) incorporando a perda viscosa é dada pela Equação 15 para formatos genéricos e de seção transversal de perfuração, para o caso de perfuração quadrada substitui-se a resistividade ao fluxo ( $\sigma\phi$ ) por  $\sigma\phi = 7\eta r^2$ , onde o raio  $\bar{r}$  é dado por  $\bar{r} = 2S/l$ ,  $l$  sendo o perímetro e  $S$  a área da seção transversal da perfuração (Allard; Atalla, 2009)

$$\tilde{\rho}_e = \rho_0 \left( 1 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\rho_0} \frac{-\frac{s}{4}\sqrt{-j} \frac{J_1(s\sqrt{-j})}{J_0(s\sqrt{-j})}}{1 - \frac{2}{s\sqrt{-j}} \frac{J_1(s\sqrt{-j})}{J_0(s\sqrt{-j})}} \right), (15)$$

Por fim, o parâmetro  $s$  é dado pela Equação 16,

$$s = c \sqrt{\frac{8\omega\rho_0}{\sigma\phi}}. (16)$$

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

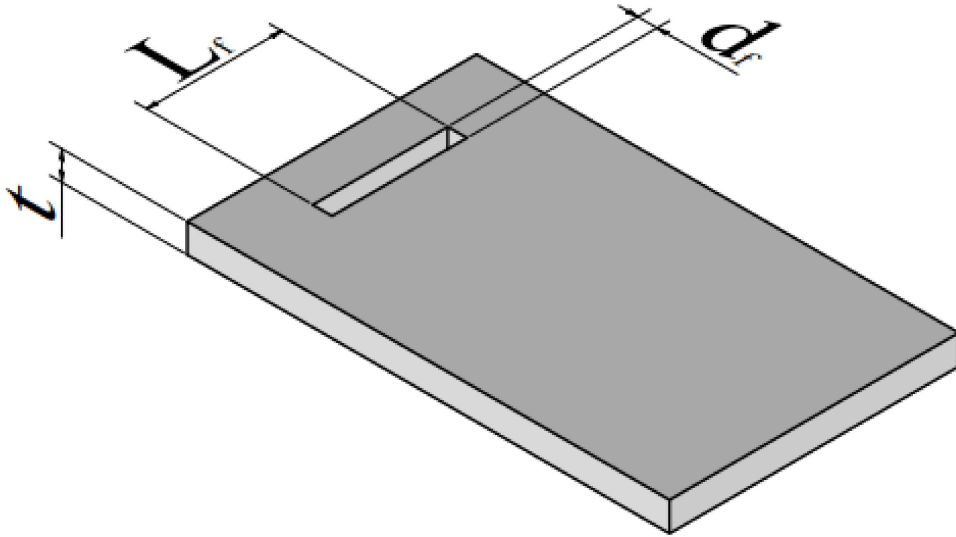
### 2.3.5 Perfuração fenda

A representação geométrica da perfuração tipo fenda está demonstrada na Figura 6. 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, empregando a função tangente hiperbólica (Ruiz, 2012).

Portanto, o cálculo da impedância acústica de uma perfuração tipo fenda ( $\tilde{Z}_{fenda}$ ) é dado pela Equação 17 a seguir,

$$\tilde{Z}_{fenda} = \frac{\Delta P}{\nu} = \frac{j\omega\rho_0 t}{\Theta} \left[ 1 - \frac{\tanh(\sigma\sqrt{j})}{\sigma\sqrt{j}} \right]^{-1} \quad (17)$$

Figura 6 – Parâmetros painel com perfuração tipo fenda.



Fonte: O Autor.

no qual  $\Theta = d_f L_f / mL$  define a porosidade e  $\sigma = d_f \sqrt{\rho_0 \omega / 4\eta}$  a constante de perfuração.

Em seu trabalho, Maa (2000) caracteriza as fórmulas exatas e aproximadas para a impedância de um absorvedor acústico de microfenda. Quando associamos várias fendas próximas, é necessário fazer correções ao modelo para ter uma representação mais precisa do comportamento acústico. Assim, o termo  $\tilde{Z}_{aresta}$  é composto por uma parte reativa ( $X_m$ ) causada pela radiação de ar no final da perfuração e outra parcela resistiva ( $R_s$ ), levando em consideração os efeitos de atrito e viscosidade. Isso é apresentado na Equação 18 a seguir,

$$\tilde{Z}_{aresta} = R_s + jX_m = \frac{\sqrt{2\rho_0\eta\omega}}{2\Theta} + j\omega\rho_0 \frac{F_e d_f}{2F(\varepsilon)\Theta} \quad (18)$$

A correção devida à radiação do ar é representada pela função de Fok, como demonstrado na Equação 19,

$$F(\varepsilon) = \left(1 - 1,4092\varepsilon + 0,33818\varepsilon^3 - 0,06793\varepsilon^5 - 0,02287\varepsilon^6 + 0,03015\varepsilon^7 - 0,01641\varepsilon^8\right)^{-1}, (19)$$

sendo  $\varepsilon = d_f/L$ . Para a aproximação do formato retangular da fenda por uma elipse é utilizada a Equação 20,

$$F_e = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta}}, (20)$$

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

Por fim, a impedância acústica do painel com todas as correções pode ser calculada pela soma das impedâncias das fendas  $\tilde{Z}_{fenda}$  com as correções de  $\tilde{Z}_{aresta}$ , resultando na Equação 21 apresentada a seguir,

$$\tilde{Z}_p = \frac{j\omega\rho_0 t}{\Theta} \left[ 1 - \frac{\tanh(\sigma\sqrt{j})}{\sigma\sqrt{j}} \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2\rho_0\eta\omega}}{2\Theta} + j\omega\rho_0 \frac{F_e d_f}{2F(\varepsilon)\Theta}. (21)$$

### 2.3.6 Modelo material poroso

Biot (1956) apresentou uma teoria de material rígido baseada em um fluido equivalente. Segundo o autor, quando a onda sonora encontra a face do material poroso, ela se propaga tanto pela estrutura rígida quanto pelo ar que preenche os poros. A primeira conversão de energia ocorre devido à fricção do ar com as paredes rígidas, e a segunda devido à onda sonora perceber a estrutura rígida como um amortecimento. Dessa forma, toda essa complexidade na conversão energética pode ser simplificada ao considerar o material como um fluido equivalente, onde a impedância do meio e o número de ondas apresentam valores complexos.

Allard e Atalla (2009) destacam que ao considerar o meio poroso como um fluido equivalente, impõe-se que o comprimento de onda seja maior que as dimensões médias dos poros no material, garantindo assim que o efeito de difusividade das ondas na região das altas frequências seja insignificante. Isso permite tratar o fluido equivalente como incompressível. Assim, a equação de onda no fluido equivalente passa a ser comandada pela equação unidimensional de onda, também conhecida como equação de Helmholtz, dada pela Equação 22:

$$\frac{\partial^2 \tilde{P}}{\partial x^2} + \omega^2 \frac{\tilde{\rho}_{ef}(\omega)}{\tilde{K}_{ef}(\omega)} \tilde{P} = 0, (22)$$

no qual  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular em  $[rad/s]$ , e  $\tilde{\rho}_{ef}$  e  $\tilde{K}_{ef}$  representam a densidade efetiva e a compressibilidade efetiva do material, respectivamente (Nussenzeig, 2022).

A densidade e a compressibilidade equivalentes do material também podem ser expressas pelas Equações 23 e 24, respectivamente (Allard; Atalla, 2009),

$$\tilde{\rho}_{eq}(\omega) = \frac{\tilde{\rho}_{ef}(\omega)}{\phi}, (23)$$

$$\tilde{K}_{eq}(\omega) = \frac{\tilde{K}_{ef}(\omega)}{\phi}, (24)$$

sendo  $\phi$  a porosidade do material. Esses dois parâmetros são importantes para caracterizar o fluido equivalente, onde o primeiro refere-se às perdas viscosas nos poros e o segundo, às perdas térmicas.

A partir desses dois parâmetros, é possível estabelecer duas importantes propriedades acústicas de um meio poroso: a impedância característica do meio e o número de onda, sendo essas propriedades descritas pelas Equações 25 e 26,

$$\tilde{Z}_c(\omega) = \sqrt{\tilde{\rho}_{eq}(\omega)\tilde{K}_{eq}(\omega)}, (25)$$

$$\tilde{k}_c(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\tilde{\rho}_{eq}(\omega)}{\tilde{K}_{eq}(\omega)}}. (26)$$

Com a Equação 26, é possível também obter a velocidade do som no material poroso utilizando a Equação 27,

$$\tilde{C}_m(\omega) = \frac{\omega}{\tilde{k}_c(\omega)} = \sqrt{\frac{\tilde{K}_{eq}(\omega)}{\tilde{\rho}_{eq}(\omega)}}. (27)$$

### 2.3.6.1 Impedância acústica de superfície

Uma onda plana propagando no ar incide sobre uma amostra de material poroso (um fluido equivalente) com pressão  $P_{inc}$ . Devido à descontinuidade entre os meios, a onda encontra uma oposição à passagem. Essa oposição, dependendo das características da superfície do material, como espessura e densidade, imprime na onda uma propagação em sentido oposto com uma pressão  $P_{ref}$ . Essa oposição é comumente chamada de impedância acústica de superfície, e, de acordo com Allard e Atalla (2009), é descrita pela Equação 28,

$$\tilde{Z}_S(\omega) = -j\tilde{Z}_c(\omega) \cot(\tilde{k}_c(\omega)L_{fe}), (28)$$

no qual  $L_{fe}$  é a espessura da amostra,  $\tilde{k}_c(\omega)$  é o número de onda complexo e  $\tilde{Z}_c(\omega)$  é a impedância característica do fluido equivalente. Para o ar,  $\tilde{Z}_c = Z_0 = \rho_0 c_0$ , onde  $\rho_0$  e  $c_0$  são a densidade e a velocidade do som no ar, respectivamente.

### 2.3.6.2 Coeficientes de reflexão e absorção sonora

Este coeficiente representa a porcentagem de energia refletida na interface entre o ar e o fluido equivalente, sendo definido como a razão entre as pressões refletida e incidente. Portanto, para incidência normal, pode ser determinado como na Equação 29,

$$R_n(\omega) = \frac{\tilde{Z}_S(\omega) - Z_0}{\tilde{Z}_S(\omega) + Z_0}. \quad (29)$$

Assim, o coeficiente de absorção sonora para ondas planas incidindo normalmente pode ser dado pela Equação 30,

$$\alpha(\omega) = 1 - |R_n(\omega)|^2. \quad (30)$$

O desenvolvimento matemático das equações citadas pode ser encontrado na literatura acústica e nas referências de Cox e D'Antonio (2017), Ingard (2010), Jacobsen e Juhl (2013), e Temkin (1981).

### 2.3.6.3 Modelo Johnson - Champoux - Allard - Lafarge (JCAL)

O modelo do material poroso escolhido para ser utilizado neste trabalho é o de Johnson - Champoux - Allard - Lafarge (JCAL). Essa escolha foi feita porque o modelo Johnson - Champoux - Allard (JCA) não descrevia satisfatoriamente o comportamento da dissipação na região de baixas frequências. Foram adicionados ao modelo parâmetros macroscópicos relacionados à dissipação térmica em baixas frequências, sendo estes a permeabilidade estática viscosa ( $q_0$ ), ligada à densidade efetiva, e a permeabilidade térmica ( $q'_0$ ).

Mareze (2013) define a permeabilidade viscosa a partir da permeabilidade viscosa dinâmica, sendo esta um parâmetro complexo que correlaciona o gradiente de pressão com a velocidade de partículas em um meio poroso, conforme apresentado na Equação 31,

$$q(\omega) = \frac{\eta\phi}{j\omega\tilde{\rho}_{ef}(\omega)}. \quad (31)$$

Deste modo, quando a Equação 31 aproxima-se do limite das baixas frequências define-se a permeabilidade estática viscosa a partir da Equação 32

$$q_0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} [q(\omega)] = \frac{\eta}{\sigma_{r,f}}. \quad (32)$$

De acordo com Allard e Atalla (2009), a permeabilidade térmica é obtida a partir do produto entre a permeabilidade viscosa e a tortuosidade do material poroso ( $q'_0 = q_0\alpha_\infty$ ). A densidade e o módulo de compressibilidade efetiva complexa podem ser dadas pelas Equações 33 e 34, respectivamente,

$$\tilde{\rho}_{ef}(\omega) = \rho_o\alpha_\infty \left[ 1 + \frac{\phi\eta}{j\omega\rho_o\alpha_\infty q_0} \sqrt{1 + j\frac{4\omega\rho_o q_0^2 \alpha_\infty^2}{\eta\phi^2 \Lambda^2}} \right], \quad (33)$$

$$\tilde{K}_{ef}(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left( 1 + \frac{\phi \eta}{j \omega \rho_0 Pr q'_0} \sqrt{1 + j \frac{4 \omega \rho_0 Pr q_0'^2}{\eta \phi^2 \Lambda'^2}} \right)^{-1}}. \quad (34)$$

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para a realização das análises necessárias na construção deste trabalho, apresentando mais detalhadamente as etapas desenvolvidas e contendo as características do modelo analítico, análises dos efeitos que os parâmetros dos materiais porosos geram quando aplicados ao metamaterial, o desenvolvimento dos modelos numéricos, e por fim como foi desenvolvido a análise experimental.

#### 3.1 MODELO ANALÍTICO DO METAMATERIAL HÍBRIDO (COM MATERIAL POROSO NA CAVIDADE INTERNA)

Os modelos analíticos aplicados têm como objetivo prever o comportamento do metamaterial, permitindo dimensionar adequadamente a estrutura e ajustar a frequência de operação desejada. Esses modelos são geralmente baseados no cálculo da impedância de superfície da estrutura em análise.

Esses modelos analíticos se baseiam nos cálculos das impedâncias acústicas individuais que compõem o metamaterial, incluindo a impedância acústica do material poroso aplicado, dos perfis de perfuração na tampa e das cavidades de espaço enrolado. Dessa forma, é possível determinar o comportamento equivalente do metamaterial completo, obtendo o valor resultante da adição dessas impedâncias acústicas. A formulação utilizada foi detalhada anteriormente na seção de fundamentação teórica.

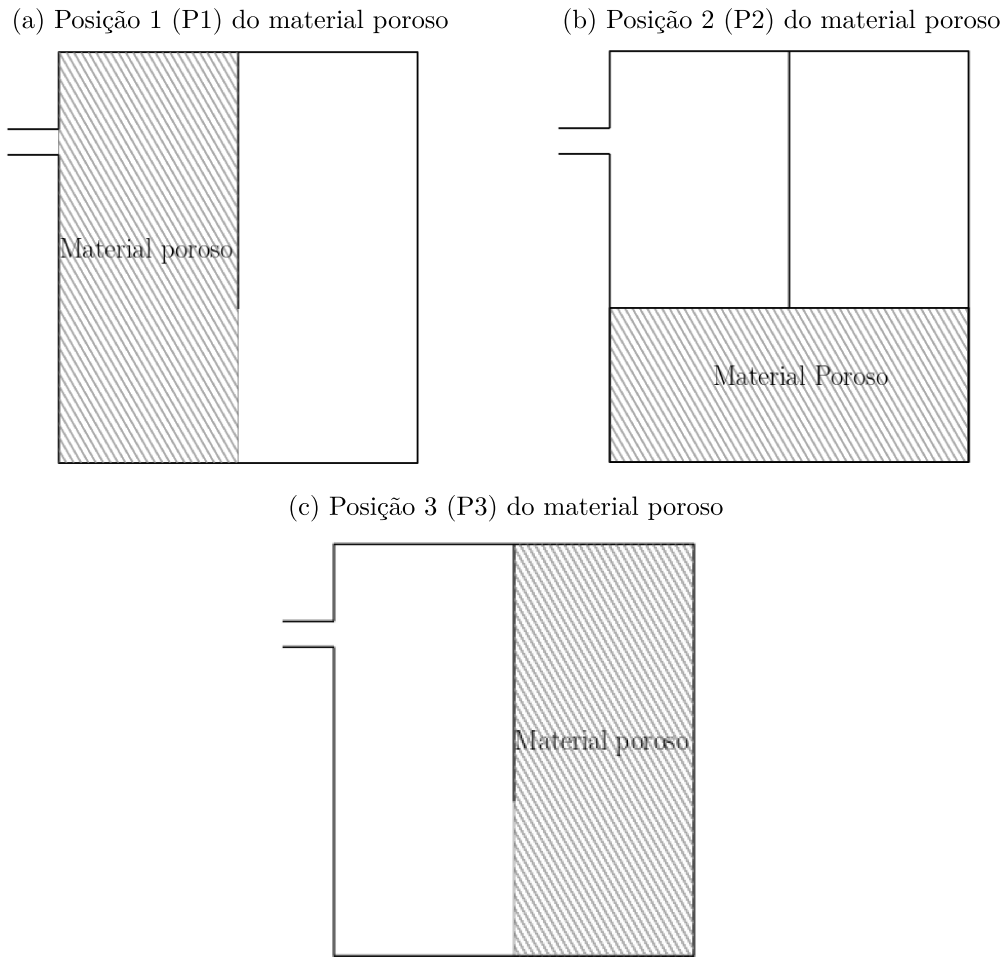
É importante destacar que os modelos analíticos consideram que a estrutura do metamaterial é composta por paredes rígidas, sem qualquer absorção adicional ou vazamento. No entanto, para a análise experimental, devido ao tipo de material e à construção das amostras, leva-se em consideração a existência de um mecanismo de absorção adicional, como a porosidade interna natural do material. Isso pode resultar em pequenas diferenças entre os resultados analíticos e experimentais.

Almeida (2019) e Cassetari (2023) realizaram em seus trabalhos a análise de sensibilidade do modelo de metamaterial para as dimensões da estrutura base, como o tamanho das perfurações, espessura das paredes e da cavidade de ar, entre outras dimensões possíveis de serem modificadas no metamaterial.

Seguindo na mesma linha de análises, neste trabalho será desenvolvida a análise para as características do material poroso, mantendo as dimensões do metamaterial constantes. Será utilizada apenas uma das três posições (posição 2), que podem ser visualizadas na Figura 7, para o material poroso interno neste trabalho, a fim de manter as dimensões da cavidade e do material poroso constantes durante o estudo.



Figura 7 – Vista em corte do metamaterial quanto ao posicionamento do material poroso.



Fonte: O Autor.

### 3.1.1 Análise de influência do modelo analítico aos parâmetros do material poroso

Neste trabalho foi feita uma análise da influência dos parâmetros dos materiais porosos no comportamento do sistema em estudo, para buscar identificar quais parâmetros exercem maior influência na resposta do sistema.

Como o modelo é composto por um painel perfurado, uma cavidade de espaço enrolado e um material absorvedor inserido no espaço enrolado em uma das posições apresentadas na Figura 7, a impedância total de superfície ( $Z_s$ ) pode ser definida pela soma da impedância do painel perfurado ( $Z_p$ ) com a impedância da cavidade ( $Z_c$ ), conforme apresentado na Equação 35,

$$Z_s = Z_p + Z_c. (35)$$

Porém a definição de  $Z_c$  varia de acordo com a posição aplicada, sendo  $Z_c = Z_{mp} + Z_{e1}$  para a posição 1,  $Z_c = Z_{e2} + Z_{mp} + Z_{e3}$  para a posição 2 e  $Z_c = Z_{e4} + Z_{mp}$ , nestes casos  $Z_{mp}$  sendo a impedância do material poroso e  $Z_{e1}$ ,  $Z_{e2}$ ,  $Z_{e3}$  e  $Z_{e4}$  as impedâncias das novas cavidades formadas internamente depois e antes da adição do material poroso.

As principais características de um material absorvedor poroso de acordo com o modelo JCAL são a resistividade ao fluxo ( $\sigma_{r,f}$ ), porosidade ( $\phi$ ), tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ), comprimento característico viscoso ( $\Lambda$ ) e comprimento característico térmico ( $\Lambda'$ ). Portanto, as análises foram focadas nessas variáveis.

Neste estudo, como base para os cálculos, foram adotadas as propriedades da melamina, um material poroso acústico comumente utilizado em aplicações de absorção sonora. As características padrão desse material, conforme relatado por Kulakauskas (2016), estão na Tabela 3. Essas propriedades fornecem uma base sólida para as análises de sensibilidade realizadas.

Tabela 3 – Propriedades e parâmetros da melamina.

Parâmetros	Valores	Unidades
Resistividade ao fluxo	12.627	$Ns/m^4$
Porosidade	90%	
Tortuosidade	1	-
Comprimento característico viscoso	$91 \times 10^{-6}$	$m$
Comprimento característico térmico	$148 \times 10^{-6}$	$m$
Densidade	10	$kg/m^3$
Permeabilidade estática viscosa	$14,57 \times 10^{-10}$	$m^2$
Permeabilidade térmica	$14,57 \times 10^{-10}$	$m^2$

Fonte: Kulakauskas (2016).

Todas as análises de sensibilidade foram conduzidas considerando a posição 2 para a aplicação do material poroso e a tampa com furação circular com diâmetro de 3,1  $mm$  como base. É importante observar que as características analisadas neste estudo geralmente estão interconectadas. No entanto, este estudo fornece informações valiosas sobre como essas características se comportam quando um dos valores é modificado no metamaterial em análise.

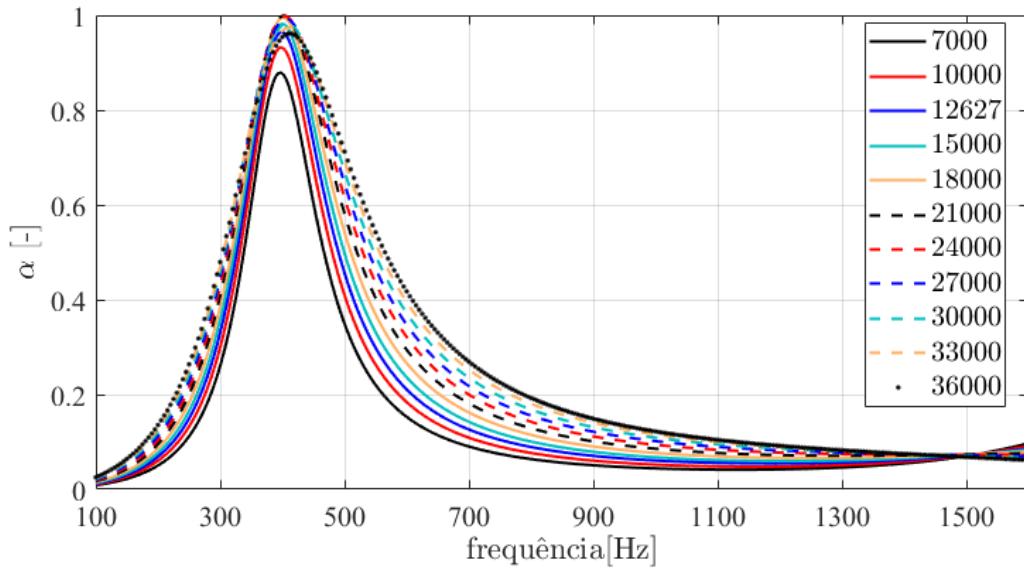
### 3.1.1.1 Resistividade ao fluxo ( $\sigma_{r,f}$ )

Para diferentes valores de resistividade ao fluxo, foram analisados os resultados de absorção sonora ao utilizar os valores base da melamina para os outros parâmetros. A análise foi conduzida com uma variação de  $3.000 Ns/m^4$ , iniciando em  $7.000$  e indo até  $36.000 Ns/m^4$ . Os resultados estão apresentados na Figura 8.

De forma geral, observa-se que o valor da resistividade ao fluxo tem uma influência direta sobre o pico de absorção apresentando um valor de 0,88 quando  $\sigma_{r,f} = 7000 Ns/m^4$ , alcançando para essa construção o valor máximo em  $\sigma_{r,f} = 21000 Ns/m^4$  e em  $\sigma_{r,f} = 36000 Ns/m^4$  apresentando uma absorção máxima de 0,96. Quando a resistividade é menor, a absorção de energia sonora também é menor, e à medida que o valor do parâmetro aumenta, a absorção também cresce. No entanto, a partir de  $24.000 Ns/m^4$ , o comportamento se inverte, indicando que para esse metamaterial o valor de resistividade ao fluxo está muito alto para as melhores condições de absorção.

No entanto, é importante notar que a largura da banda em 50% continua a aumentar, saindo de  $\Delta_{f50\%} = 125$  Hz para o menor valor de resistividade para  $\Delta_{f50\%} = 255$  Hz quando a resistividade ao fluxo é igual a  $36.000 \text{ N s/m}^4$ .

Figura 8 – Coeficiente de absorção sonora para variação na resistividade ao fluxo, cavidade  $n=2$  com material poroso posição 2.



Fonte: O Autor.

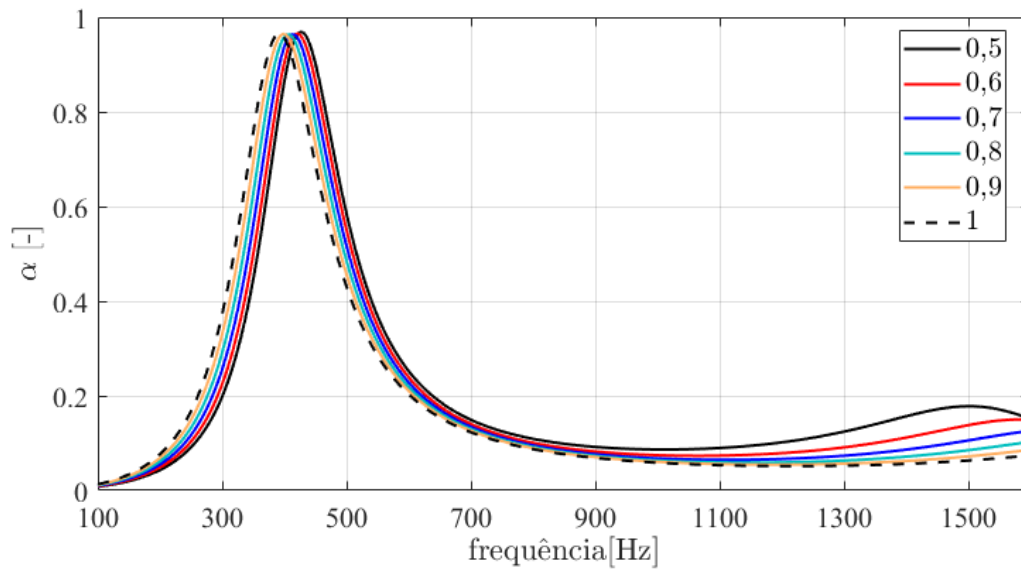
### 3.1.1.2 Porosidade ( $\phi$ )

Para a análise da porosidade, foi variado o valor em incrementos de 0,1, indo de 0,5 a 1. Isso permitiu gerar a Figura 9, que demonstra os efeitos na absorção sonora. Como pode ser observado, o valor máximo de absorção não apresenta mudanças significativas. No entanto, à medida que o valor da porosidade aumenta, a frequência de pico diminui, indo de 425 Hz para uma porosidade de 0,5 para 390 Hz com uma porosidade igual a 1. A mudança mais significativa ocorre na faixa de frequência mais alta da análise, entre 1.100 e 1.600 Hz, onde é observado um aumento na absorção à medida que o valor da porosidade diminui, gerando uma região com características de segunda ressonância do metamaterial híbrido com material poroso nas cavidades. Essa análise é importante para compreender como a porosidade afeta o desempenho acústico do metamaterial.

### 3.1.1.3 Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ )

Continuando com o padrão estabelecido, foi realizada a análise de sensibilidade da tortuosidade, variando seu valor em incrementos de 0,1, começando em 0,5 e indo até 1. Conforme observado na Figura 10, não houve alterações no valor máximo de absorção e largura de banda de 50% quando o valor da tortuosidade foi modificado ambas se mantendo em seus valores originais de 0,96 e 160 Hz, respectivamente. Esses resultados sugerem que

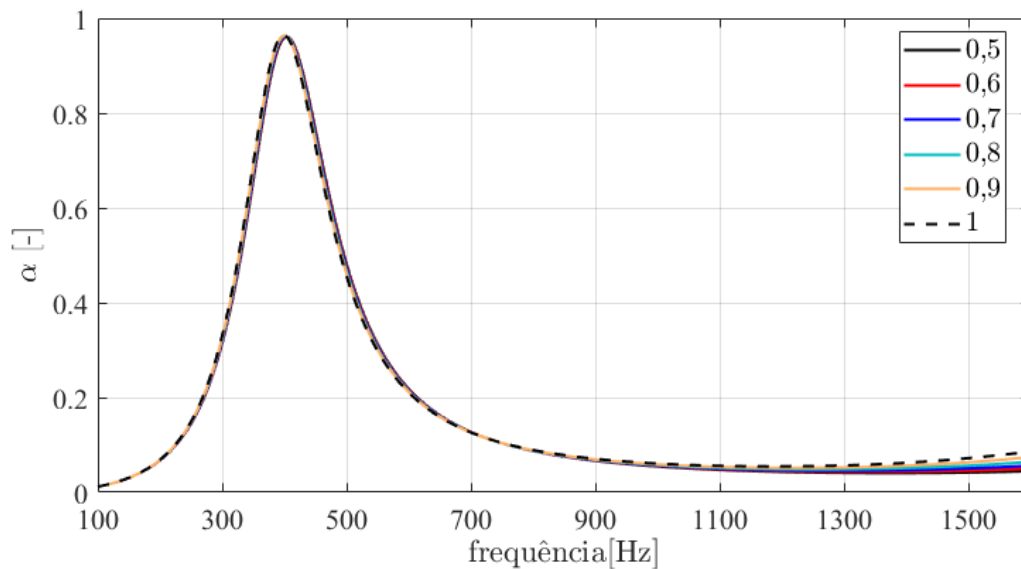
Figura 9 – Coeficiente de absorção sonora para variação na porosidade, cavidade  $n=2$  com material poroso posição 2.



Fonte: O Autor.

a tortuosidade tem um impacto limitado no desempenho acústico do metamaterial, pelo menos dentro das faixas de valores consideradas nesta análise.

Figura 10 – Coeficiente de absorção sonora para variação na tortuosidade, cavidade  $n=2$  com material poroso posição 2.



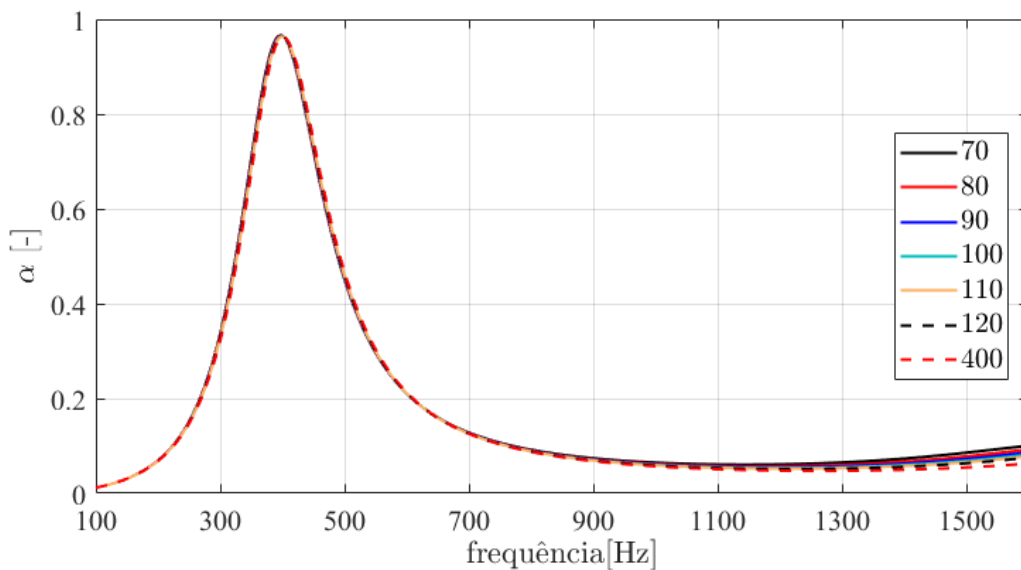
Fonte: O Autor.

#### 3.1.1.4 Comprimento característico viscoso ( $\Lambda$ )

A análise de sensibilidade do comprimento característico viscoso seguiu uma variação de  $10 \times 10^{-6} m$  e foi realizada com uma varredura de  $70 \times 10^{-6}$  a  $120 \times 10^{-6} m$ .

Além disso, uma única avaliação foi feita em  $400 \times 10^{-6} m$  para verificar se havia alguma alteração com valores mais elevados. Como observado na Figura 11, não houve mudanças nas curvas na região de interesse quando o valor desse parâmetro foi alterado, todos os parâmetros de análise continuaram os mesmos sendo a frequência de pico em 400 Hz, absorção máxima de 0,96 e  $\Delta_{f50\%} = 160$  Hz. Isso sugere que o comprimento característico viscoso tem um impacto limitado na absorção sonora do metamaterial dentro das faixas de valores consideradas nesta análise.

Figura 11 – Coeficiente de absorção sonora para variação do comprimento característico viscoso, cavidade  $n=2$  com material poroso posição 2.

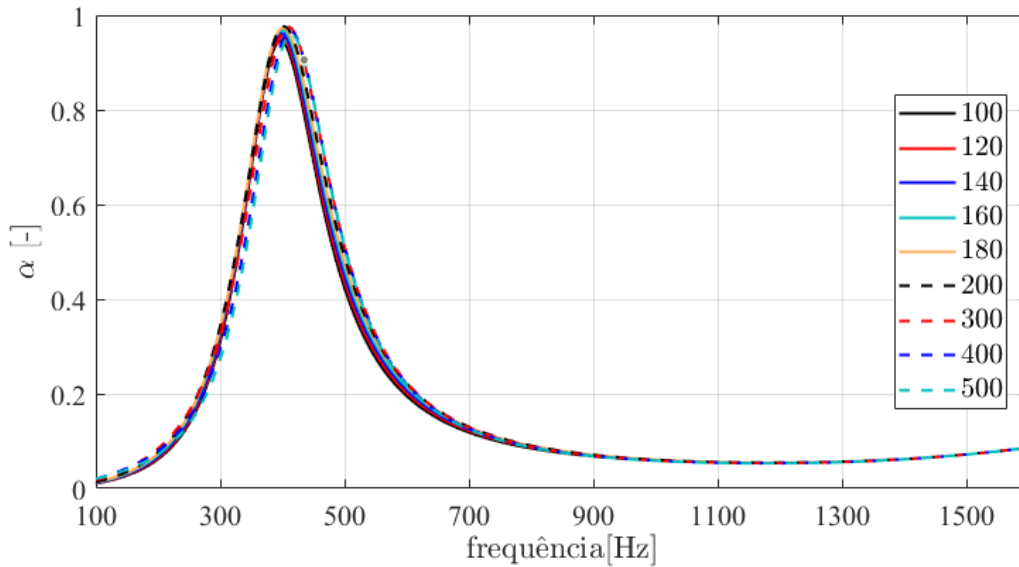


Fonte: O Autor.

### 3.1.1.5 Comprimento característico térmico ( $\Lambda'$ )

O parâmetro de comprimento característico térmico foi testado variando-o inicialmente de  $20 \times 10^{-6}$  até  $200 \times 10^{-6} m$ , e depois com uma variação de  $100 \times 10^{-6} m$  até  $500 \times 10^{-6} m$  para verificar se algum efeito surgiria com valores maiores. A Figura 12 apresenta os resultados dessa análise, e pode-se notar que há uma pequena variação no valor máximo de absorção, começando em 0,94 para  $100 \times 10^{-6} m$  aumentando para 0,97 em  $200 \times 10^{-6}$  e  $300 \times 10^{-6} m$  e reduzindo para 0,96 quando utilizado  $\Lambda' = 500 \times 10^{-6} m$ , ainda há uma pequena mudança nos valores da frequência de pico partindo de 400 Hz para os valores até  $\Lambda' = 200 \times 10^{-6} m$  e mudando para 415 Hz em  $\Lambda' = 400 \times 10^{-6}$  e  $500 \times 10^{-6} m$ . No entanto, não há uma variação na banda de frequência de 50%, esta mantendo-se em 160 Hz para todos os valores analisados.

Figura 12 – Coeficiente de absorção sonora para variação do comprimento característico térmico, cavidade  $n=2$  com material poroso posição 2.



Fonte: O Autor.

### 3.2 ANÁLISE NUMÉRICA DO METAMATERIAL HÍBRIDO (COM MATERIAL POROSO NA CAVIDADE INTERNA)

O modelo numérico do absorvedor sonoro é construído a partir do método de elementos finitos, conhecido também como *FEM* (*Finite Element Method*). O *FEM* é utilizado para solucionar problemas em diversos campos das ciências aplicadas e engenharias. Este método é um dos mais utilizados para a solução de problemas que envolvem a descrição do comportamento de sistemas físicos e pode ser aplicado para resolver praticamente qualquer tipo de problema (Dhatt; Touzot; Lefrançois, 2012).

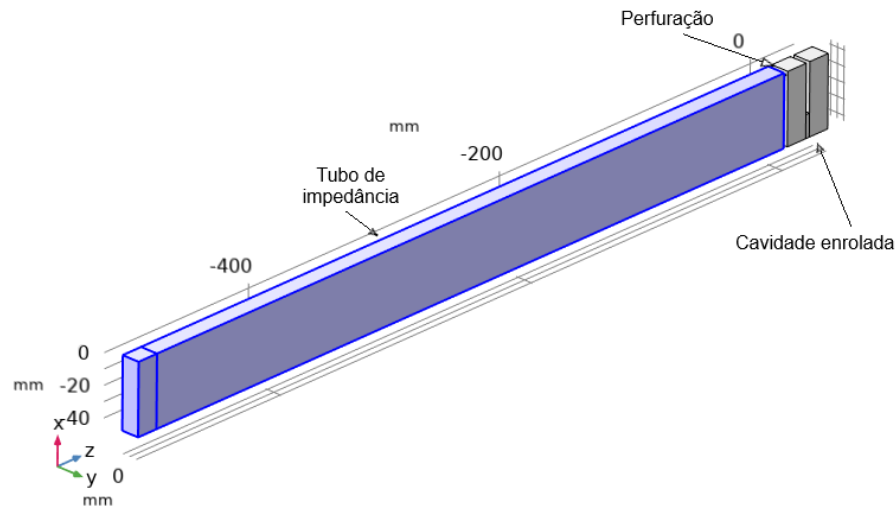
As simulações computacionais foram realizadas no *software* comercial COMSOL *Multiphysics*. O modelo construído no programa é uma réplica do experimento no tubo de impedância. Nele, é aplicada uma pressão acústica de 1 *Pa* em uma das extremidades do domínio, enquanto na outra extremidade existe a representação do metamaterial estudado. A malha utilizada foi a tetraédrica livre, com o refinamento dependendo da geometria e da faixa de frequência analisada, tentando manter um bom equilíbrio entre o tempo de processamento e resultados precisos.

Também são utilizados dois tipos de módulos distintos para descrever o comportamento do metamaterial, o primeiro sendo o de pressão acústica e o segundo é o módulo de acústica termo-viscosa. A parte de pressão acústica é aplicada para a porção que simula o tubo de impedância, e o modelo de acústica termo-viscosa para a representação do metamaterial. A faixa de frequência trabalhada em geral foi entre 100 e 1.600 Hz, para corresponder ao tubo de impedância que será utilizado nos testes experimentais.

Na Figura 13 está a geometria do sistema utilizada para a análise numérica por

FEM.

Figura 13 – Geometria do modelo numérico n=2



Fonte: O Autor.

O módulo de pressão acústica envolve a solução de equações para pequenas variações de pressão, representadas por  $p_1$ , acima da pressão estática de fundo, denotada por  $p_0$ . Matematicamente, isso corresponde à linearização das variáveis dependentes em torno dos valores estacionários. É apropriado para simulações no domínio da frequência com variações harmônicas no campo de pressão e pode ser usado em modelos acústicos que descrevem interações entre estruturas e ondas acústicas (COMSOL Multiphysics, 2022).

O módulo de acústica termo-viscosa é usado para calcular variações acústicas de pressão, velocidade e temperatura. Esse módulo físico é necessário para obter cálculos precisos em geometrias de pequenas dimensões. Nas proximidades das paredes, as perdas viscosas e a condução térmica tornam-se significativas devido à presença das camadas limite. Portanto, é necessário incluir explicitamente os efeitos de condução térmica e as perdas viscosas nas equações governantes. Essa interface resolve as equações no domínio das frequências, considerando que todos os campos e fontes são harmônicos (COMSOL Multiphysics, 2022).

É importante destacar o custo computacional necessário para a solução desse tipo de análise. À medida que a faixa de frequência analisada aumenta, o domínio precisa ser discretizado com uma malha mais fina, já que o comprimento de onda diminui e a dimensão de cada elemento precisa ser reduzida para obter resultados satisfatórios. Modelos muito complexos também podem ser problemáticos se uma resolução de malha muito alta for necessária para obter as informações necessárias. Existem alguns critérios que podem ser seguidos para reduzir erros nas soluções, como o critério de Nyquist, que estabelece um número mínimo de elementos de malha por comprimento de onda. Algumas estratégias para mitigar o custo computacional incluem a redução da faixa de frequência analisada ou o aumento do intervalo de incremento da frequência calculada.

As simulações neste estudo foram realizadas em um computador com as seguintes configurações: processador AMD Ryzen 7 2700, 32 GB de memória RAM, placa de vídeo NVIDIA GeForce GT710 e SSD Kingston de 240 GB.

### 3.2.1 Modelo individual (célula unitária do metamaterial híbrido)

Inicialmente, foi criado um modelo contendo apenas uma cavidade que utilizava 100% da área superficial da geometria aplicada, ou seja, utiliza a área superficial total do metamaterial em questão. Com isso, as informações obtidas podem ser comparadas diretamente aos resultados do modelo analítico sem a necessidade de correções. A faixa de frequência utilizada neste estudo varia de 100 a 1.600 Hz, com um incremento de 5 Hz. Essa faixa de frequência foi escolhida para melhor correlacionar com os valores experimentais, uma vez que corresponde à faixa de trabalho do tubo de impedância utilizado nos experimentos para determinar o coeficiente de absorção sonora.

Foram realizados testes com diferentes tamanhos de malhas usando as configurações padrão disponíveis no *software COMSOL Multiphysics* para determinar se ocorrem grandes divergências entre os tamanhos. Isso ajudou a decidir qual malha deveria ser utilizada, já que uma malha mais fina requer mais tempo de processamento devido ao custo computacional adicional.

Foram conduzidas simulações com três tamanhos distintos de malha, categorizados no programa como "*Finer*" (Fino), "*Extra Fine*" (Extra Fino) e "*Extremely Fine*" (Extremamente Fino), sendo este último o menor tamanho de elemento entre os mencionados. A Figura 14 ilustra a diferença entre os três tamanhos de malha usando uma cavidade de  $n=2$  com material poroso interno como exemplo.

Na Tabela 4, apresenta-se a comparação entre o número de elementos, graus de liberdade e tempo de processamento necessários para a solução numérica do modelo, considerando diferentes tamanhos de malha.

Tabela 4 – Comparação entre os diferentes tamanhos de malhas no modelo de única célula.

Tamanho da malha	Elementos	Graus de liberdade	Tempo(s)
<i>Finer</i>	4.531	11.572	99
<i>Extra Fine</i>	9.224	26.007	301
<i>Extremely Fine</i>	24.827	77.985	2171

Fonte: O Autor.

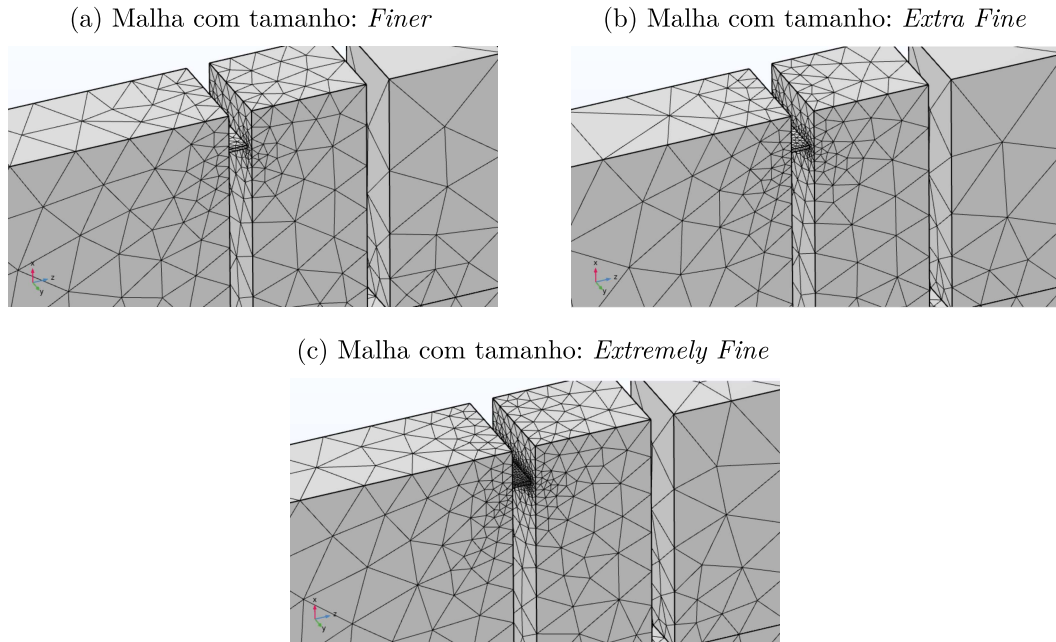
Conforme o tamanho dos elementos da malha diminui, o grau de precisão dos resultados aumenta. No entanto, como indicado pelos dados na Tabela 4, o custo computacional aumenta consideravelmente, enquanto as diferenças nos resultados não são significativas.

A Figura 15 mostra os resultados da simulação da mesma cavidade, variando apenas o tamanho dos elementos da malha. É possível observar que a diferença entre a malha mais fina, que possui os elementos de menor tamanho e maior tempo de processamento para encontrar uma solução, e a malha menos refinada é praticamente indistinguível, com



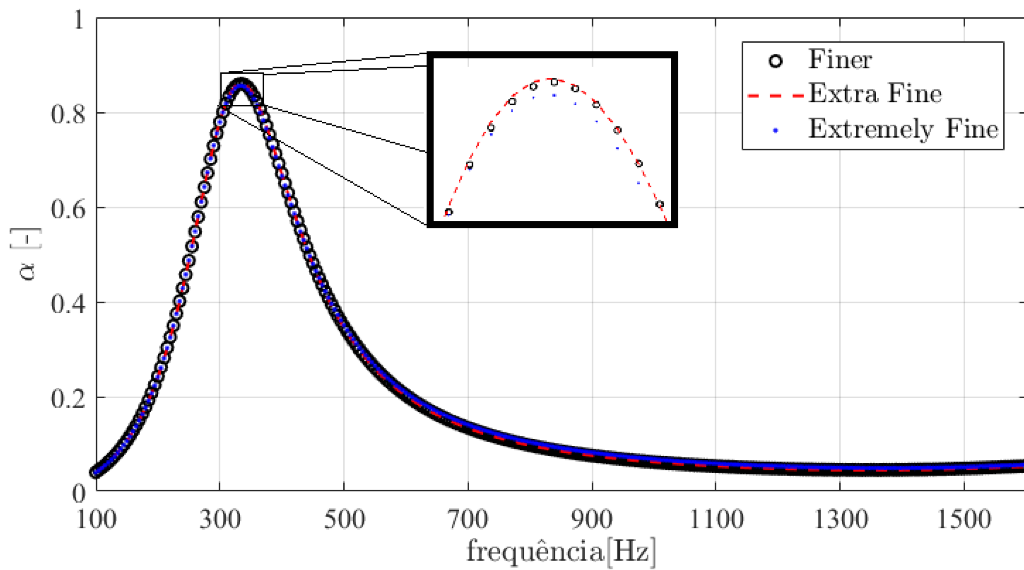
uma diferença de aproximadamente 0,6% nos valores máximos dos picos de absorção. Para a malha "*Finer*" os valores de  $\alpha$  foram de 0,8611, para "*Extra Fine*" 0,8599 e, finalmente, para "*Extremely Fine*" um valor de  $\alpha$  de 0,8557.

Figura 14 – Comparação tamanhos de malhas.



Fonte: O Autor.

Figura 15 – Resultados para diferentes refino de malhas com  $n=2$  e material poroso incluído na cavidade.



Com base nesses resultados, foi decidido que a malha com tamanho "*Finer*" seria a mais apropriada para o estudo, uma vez que a diferença nos resultados é bastante baixa e o tempo de solução é mais rápido. Isso permitiria a realização de diversos testes para

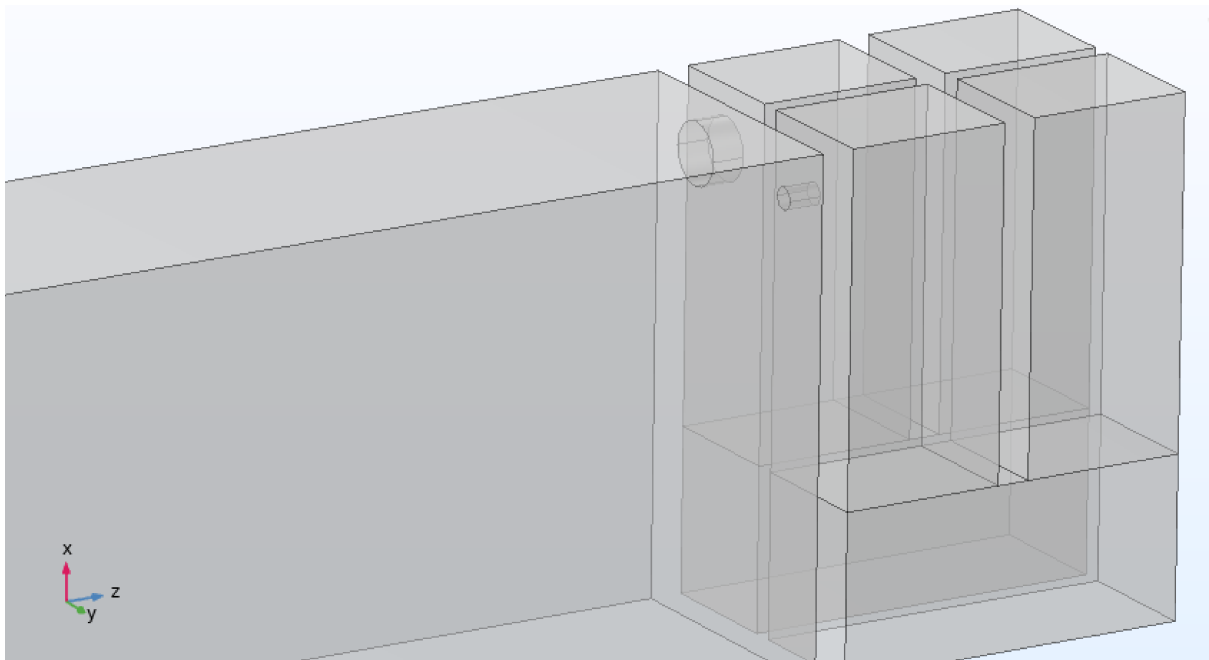
entender o comportamento do material, bem como possibilitaria a utilização do modelo computacional para a comparação de sensibilidades dos parâmetros dos materiais porosos, caso houvesse a necessidade de realizar tais comparações.

### 3.2.2 Modelo complexo (com mais de um tipo de célula do metamaterial híbrido)

Com base nas informações previamente obtidas com o modelo individual, foi desenvolvido o modelo complexo, que nada mais é do que a combinação de dois modelos de células individuais de cavidade, cada um com parâmetros de entrada diferentes. Esse modelo foi criado para simular as propriedades resultantes quando essas cavidades são aplicadas em conjunto, a partir dele buscando características que apresentem desempenho superior ao de uma célula do metamaterial, buscando incorporar tipos de perfurações diferenciados para gerar alargamento na banda de absorção.

A Figura 16 ilustra um exemplo desse modelo complexo, onde são representadas duas cavidades com entradas de diferentes diâmetros, a maior de diâmetro  $4,8\text{ mm}$  e a menor com  $1,6\text{ mm}$ , para gerar dois picos de absorção em frequências distintas porém próximas para gerar uma banda de absorção maior. No entanto, foram realizadas simulações com várias configurações de entradas e posicionamento de material poroso dentro das cavidades, a fim de comparar os resultados com os modelos analíticos e experimentais.

Figura 16 – Modelo complexo apresentando duas perfurações de entrada de diâmetros diferentes.



Fonte: O Autor.

Em relação ao tamanho da malha a ser utilizada, foi realizada uma nova comparação entre os três tamanhos de malha para determinar as diferenças entre os resultados gerados

por cada tamanho, levando em consideração também a demanda computacional de cada um.

Na Tabela 5, é possível observar novamente o efeito da redução do tamanho dos elementos da malha no tempo necessário para encontrar a solução numérica do problema. A malha mais fina leva mais de 5 vezes o tempo em comparação com o maior tamanho de malha.

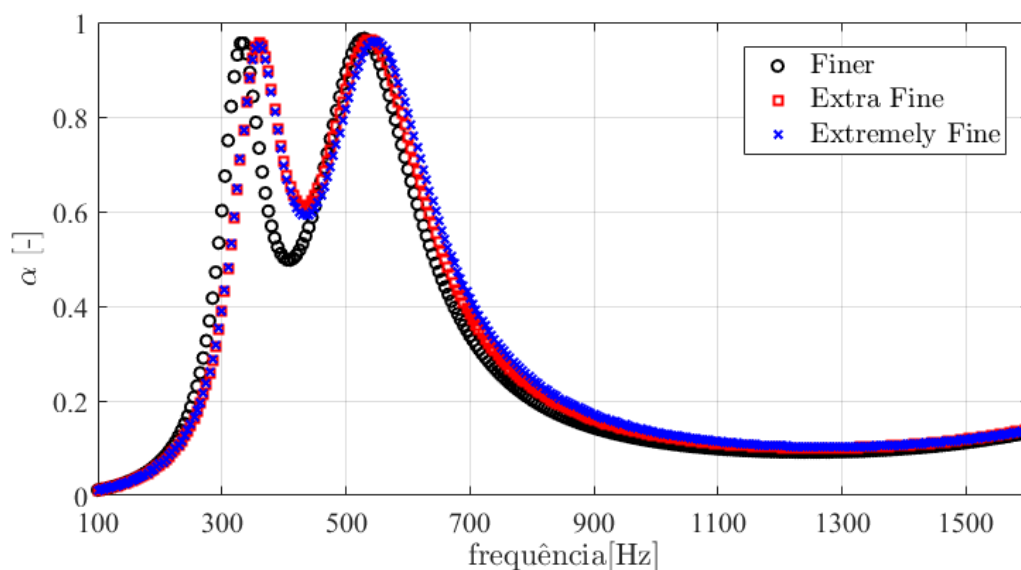
Tabela 5 – Comparação entre os diferentes tamanhos de malhas no modelo complexo.

Tamanho da malha	Elementos	Graus de liberdade	Tempo(s)
<i>Finer</i>	4.256	11.535	97
<i>Extra Fine</i>	7.411	20.034	223
<i>Extremely Fine</i>	16.852	38.484	525

Fonte: O Autor.

No entanto, neste caso, os resultados apresentam uma grande diferença devido à maior complexidade do sistema utilizado em comparação com o caso individual. A Figura 17 mostra os resultados das simulações com os três tamanhos de malha, e é evidente que a malha mais grosseira não é adequada para determinar com precisão os resultados, especialmente na faixa de menor frequência (entre 200 e 400 Hz). No entanto, as outras duas malhas produzem resultados semelhantes, com apenas uma pequena diferença no pico de maior frequência, que corresponde a apenas 10 Hz, e uma diferença de absorção de 0,25%.

Figura 17 – Coeficiente de absorção sonora para diferentes tamanhos de malhas com  $n=2$ , material poroso incluído na cavidade e modelo complexo.



Fonte: O Autor.

Levando em consideração que a faixa de trabalho utilizada neste estudo varia de 100 a 1.600 Hz, a fim de simular a faixa de trabalho do tubo de impedância posteriormente

usado nos experimentos, e com um incremento de 5 Hz, a diferença entre os dois tamanhos de malha mais finos é muito pequena. Portanto, para este estudo, foi decidido que o tamanho de malha "*Extra Fine*" seria o mais apropriado para os modelos complexos.

Também é possível notar que com a existência de dois tamanhos de entrada distintos há a ocorrência de dois picos, cada pico de absorção representa a absorção de uma das células que compõem o metamaterial, onde o pico de maior frequência corresponde o de maior diâmetro e o de menor frequência ao menor diâmetro.

A principal vantagem do uso de dois tipos de células para a composição do metamaterial, mesmo sendo a mesma cavidade compartilhada entre elas, é a extensão da banda de frequência de absorção do metamaterial a partir de apenas um tipo de modificação no metamaterial, a perfuração de entrada.

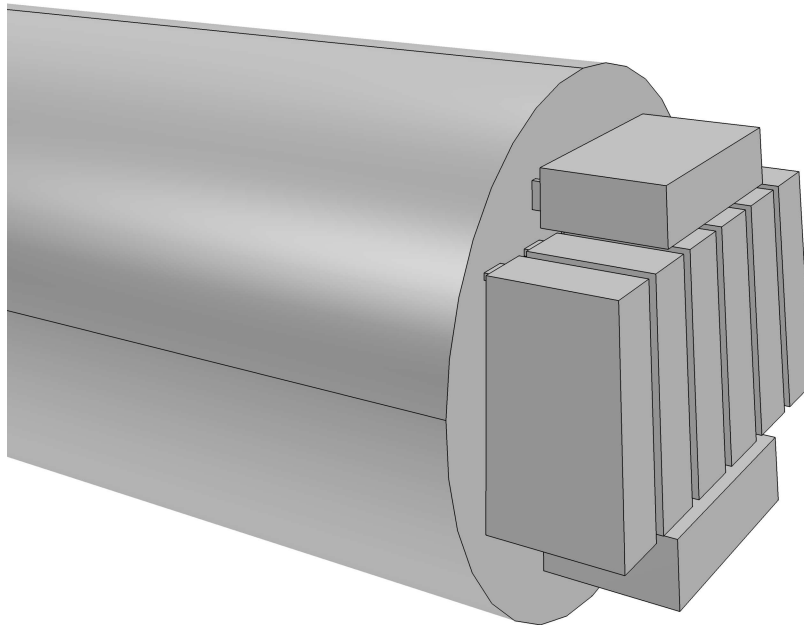
### 3.2.3 Modelo completo do metamaterial labiríntico com material poroso

O modelo completo do metamaterial labiríntico com material poroso foi utilizado com o objetivo de representar integralmente o que ocorre durante os testes no tubo de impedância, visto que as amostras em questão não consistem em apenas uma cavidade, mas são distribuídas em um cilindro com um diâmetro de 107 *mm* para serem usadas nos ensaios. Esse método foi empregado para confirmar que os valores previamente obtidos usando apenas os outros modelos numéricos (complexo e individual) são suficientemente representativos para serem comparados diretamente com os resultados experimentais.

Portanto, o modelo aqui empregado engloba o diâmetro completo do tubo de impedância e as outras cavidades presentes nas amostras. No entanto, devido à complexidade desses modelos, o custo computacional aumenta em aproximadamente 4 a 5 vezes, dependendo da geometria da perfuração e da cavidade, devido ao aumento dos números de nós a serem analisados.

A Figura 18 ilustra um exemplo do modelo completo do tubo de impedância juntamente com a amostra do metamaterial labiríntico com material poroso interno. Este modelo é o mais completo entre os estudados e foi usado com menor frequência para comparações nos resultados já que apresenta um custo computacional muito elevado, porém seria o mais apropriado para comparações diretas com o modelo experimental em vez dos modelos numéricos complexos e individuais, sendo que este modelo apresenta todas as características que as amostras experimentais também possuem, como menor área de aproveitamento superficial e outras características geométricas que podem afetar os resultados acústicos. É importante destacar que é possível obter resultados de forma mais eficiente utilizando modelos mais simples e aplicando correções aos resultados experimentais. Isso permite realizar as comparações necessárias sem a necessidade de utilizar o modelo completo.

Figura 18 – Exemplo de modelo numérico completo com todas as cavidades como nas amostras experimentais.



Fonte: O autor.

### 3.3 ENSAIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Os ensaios experimentais foram conduzidos em tubos de impedância, seguindo os procedimentos estabelecidos na norma ISO 10534-2 (1998). O tubo utilizado para as análises é um tubo circular de aço com um diâmetro interno de 107 *mm*.

Na Figura 19, é apresentada uma bancada de teste convencional, equipada com os dispositivos necessários para a realização dos experimentos. Os itens 1 e 2 representam os microfones usados para medição, o item 3 é o gerador de sinal e o item 4 é o amplificador.

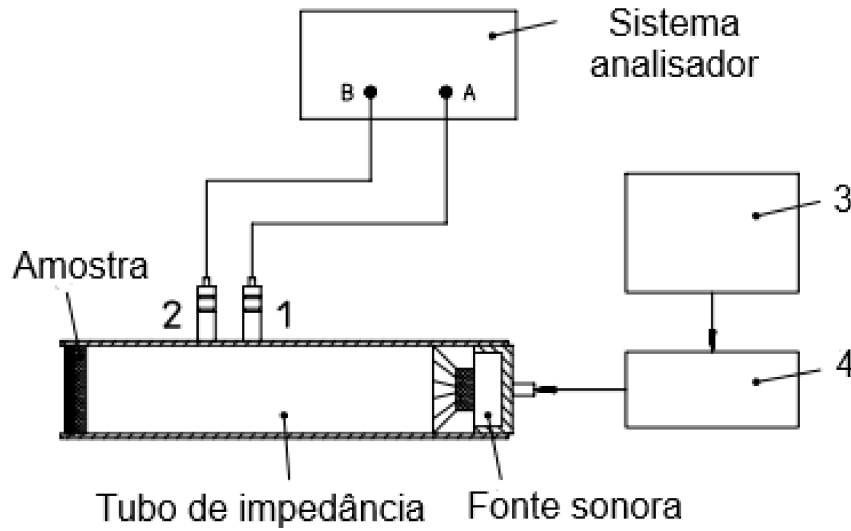
O tubo de impedância possui uma faixa de frequência de operação definida pela norma como  $f_l < f < f_u$ , sendo  $f_l$  a frequência mínima de operação do tubo e  $f_u$  é a frequência máxima de operação. A frequência inferior,  $f_l$ , é determinada pela capacidade do equipamento de processamento de sinal e, neste estudo, foi definida como 100 Hz, uma vez que o equipamento ainda fornecia resultados confiáveis sem ruídos ou perda de informação.

A frequência superior,  $f_u$ , pode ser determinada conforme a norma ISO 10534-2 (1998) usando a seguinte fórmula:

$$f_u \cdot d < 0,50c_0, (36)$$

onde  $d$  é o diâmetro interno do tubo (em *m*). Portanto, a partir da Equação 36, o resultado é uma frequência superior limite de 1.603 Hz.

Figura 19 – Bancada de equipamentos necessários para teste experimental em tubo de impedância.



Fonte: Adaptado de ISO:10534-2(1998).

O sinal utilizado para os testes pode ser aleatório, pseudo-aleatório ou *chirp* de acordo com a norma ISO, neste caso foi utilizado o sinal aleatório pela capacidade de excitação de todas as frequências de interesse com aproximadamente o mesmo nível energético. O procedimento do teste é descrito da seguinte forma, de acordo com a norma ISO 10534-2 (1998): as pressões sonoras  $P_1$  e  $P_2$  são medidas pelos microfones 1 e 2 em dois pontos pré-definidos pela norma, com distâncias relacionadas às dimensões do tubo. A função de transferência complexa ( $H_{1,2}^I$ ) é então determinada entre os dois microfones usando a Equação 37,

$$H_{1,2}^I = \frac{P_1}{P_2}.(37)$$

Para evitar erros devido à diferença de fase entre os microfones, a norma ISO 10534-2 (1998) apresenta um procedimento no qual uma nova função de transferência ( $H_{1,2}^{II}$ ) é gerada trocando as posições dos microfones, e então a nova função é corrigida usando a Equação 38,

$$H_{cor} = \left( \frac{H_{1,2}^I}{H_{2,1}^{II}} \right)^{\frac{1}{2}}.(38)$$

A partir da função corrigida, o coeficiente de reflexão é obtido usando a Equação 39

$$R_{cor} = \frac{H_{cor} - e^{-jk_0S}}{e^{jk_0S} - H_{cor}} e^{j2k_0x_1},(39)$$

onde  $k_0$  é o número de onda,  $S$  é a distância entre os microfones e  $x_1$  é a distância entre o microfone 1 e a amostra.

Com o resultado do coeficiente de reflexão, o valor do coeficiente de absorção é calculado de acordo com a Equação 40

$$\alpha_{\text{cor}} = 1 - |R_{\text{cor}}|^2. (40)$$

### 3.3.1 Escolha das amostras

A escolha das amostras para a realização dos testes experimentais levou em consideração diversos fatores. Cada amostra é composta por duas partes: a cavidade enrolada e uma tampa perfurada. A combinação dessas duas partes resulta no metamaterial a ser estudado.

A cavidade enrolada selecionada possui  $n=2$  cavidades (ou espaços enrolados), uma vez que esse é o tipo mais simples de enrolamento e o que possibilitou a criação do maior número de amostras. Portanto, essa cavidade foi a escolhida, sendo identificada pela letra *A* na nomenclatura dos resultados.

Além da cavidade, as amostras também requerem a utilização de uma tampa. Um total de 64 tipos de tampas estava disponível para o estudo. No entanto, essa seleção de tampas inclui variedades de materiais e perfurações repetidas. Portanto, foi necessário escolher quais delas seriam utilizadas. A seleção das tampas se deu da seguinte maneira: inicialmente foram selecionados as geometrias das perfurações a serem utilizadas (quadrado, circular e fenda), na sequência foram escolhidas tampas com perfurações sem repetição de tamanho dentre as disponíveis, ou seja, nenhuma tampa duplicada (tampas com perfurações de mesmo tamanho), depois foi escolhido os tamanhos de perfurações para avaliar uma gama de diferentes frequências de pico de absorção, utilizando pelo menos 3 tamanhos distintos variando entre 1,6 *mm* de lateral (ou diâmetro caso perfuração circular) e 5,9 *mm*, e por fim aquelas que apresentavam espessura de aproximadamente 3 *mm* (devido a variação inerente do material as espessuras ficaram entre 2,9 e 3,1 *mm*).

Para identificar as amostras e os resultados correspondentes, foram criados códigos que representam algumas das características construtivas. A Tabela 6 abaixo, segue a lógica de construção dos nomes utilizados para as amostras.

Além da numeração existe ainda uma letra como prefixo para identificação da cavidade utilizada, e um sufixo para identificar o tipo de material absorvedor e a posição da aplicação dentro da amostra. Dessa forma, a amostra *A210181mp1* refere-se a uma amostra que possui a cavidade do tipo *A*, com perfurações circulares, um tipo específico de furo, construída inteiramente com MDF, com um diâmetro de perfuração na tampa de 1,8 *mm* e com melamina na posição 1.

Inicialmente, foram conduzidos ensaios com todas as tampas feitas de MDF, um para cada tampa gerando 44 resultados preliminares, excluindo, portanto, as tampas de outros materiais. Com base nos resultados preliminares, foram selecionadas as tampas a serem utilizadas, reduzindo a quantidade de amostras para um total de 20. Foram

Tabela 6 – Lógica da nomenclatura das amostras.

Tipo de perfuração	
Furo quadrado	1xxxxx
Furo circular	2xxxxx
Furo retangular	3xxxxx
Quantia de tipos de furos	
1	x1xxxx
2	x2xxxx
3	x3xxxx
Tipo de material	
MDF	xx0xxx
Acrílico	xx1xxx
Dimensão do furo	
Exemplo 2,3mm	xxx23x
Ultimo dígito é para tornar a contagem única variando de 0 a 9	

Fonte: O autor.

escolhidas aquelas que apresentaram resultados relevantes, ao mesmo tempo em que as amostras com falhas ou problemas construtivos foram excluídas.

Além disso, buscou-se eliminar as tampas que apresentavam repetições excessivas, priorizando aquelas com os melhores resultados, uma vez que essas se aproximariam mais dos valores numéricos e teóricos desejados. Por fim, também foi de interesse obter perfurações de diversos tamanhos, a fim de possibilitar a obtenção de resultados em que a área das perfurações aumentasse de forma consistente. Cada amostra passando por 4 testes, inicialmente sem material poroso e depois alterando a posição do material absorvedor aplicado internamente, resultando em 80 experimentos com resultados sendo apresentados no próximo capítulo.

Na Figura 20 são apresentadas duas tampas de MDF idênticas que foram excluídas das amostras a serem utilizadas. Já nas Figuras 21(a),(b) e (c) apresentam o material poroso colocado internamente na cavidade para cada posição investigada, e na Figura 21(d), a amostra completamente montada.

### 3.3.2 Ensaios no tubo de impedância

A realização dos ensaios seguiu os procedimentos descritos na norma ISO 10534-2 (1998), conforme detalhado anteriormente na seção 3.3.

Para a condução dos ensaios, foram empregados os seguintes equipamentos:

- 1 analisador de sinais Bruel & Kjaer LAN-XI type 3160-B-042;
- 1 computador com o *software* B&K Connect;
- 2 microfones Bruel & Kjaer do tipo 4189;
- 1 calibrador Bruel & Kjaer do tipo 4231;



Figura 20 – Tampas de mesmas dimensões



Fonte: O autor.

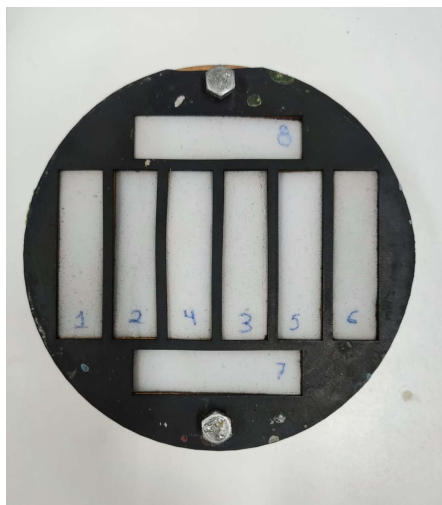
- 1 amplificador de potência Bruel & Kjaer tipo 2718;
- 1 tubo de impedância com diâmetro interno de 107 mm.

Em seguida, prosseguindo os ensaios foi instalado o material poroso de melamina nas posições 1 e 2 das cavidades. Subsequentemente, continuando os ensaios, desta vez utilizando lã de PET como o material poroso nas cavidades, nas posições 1 e 2. Por fim, uma amostra com a tampa de fundo removível para conduzir os ensaios com os materiais porosos na posição 3 foi utilizada.

A Figura 22 apresenta o tubo de impedância e os microfones utilizados para os experimentos realizados nesse estudo.

Figura 21 – Exemplo de amostras utilizadas

(a) Cavidade com material poroso ( melamina) na posição 1



(b) Cavidade com material poroso (melamina) na posição 2



(c) Cavidade com material poroso (lã de PET) na posição 3



(d) Amostra completa



Fonte: O Autor.

Figura 22 – Bancada com tubo de impedância junto aos microfones utilizados para realização dos testes.



Fonte: O autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O método de fabricação utilizado no estudo permite a combinação de um elemento com cavidades e um painel frontal para a formação de várias amostras de metamateriais com características construtivas distintas. Conforme descrito no Capítulo 3, uma nomenclatura para as amostras foi gerada com base nas dimensões dos painéis frontais e do elemento de cavidades utilizado. Para o elemento com cavidades, foi atribuído um código alfabético para facilitar a identificação. As dimensões das cavidades estão detalhadas na Tabela 7, sendo ambos os corpos de mesma dimensão, com a única diferença de que o Elemento *I* possui um painel de fundo removível, permitindo a aplicação de material poroso na parte posterior do metamaterial.

Tabela 7 – Dimensões da cavidade utilizada para a construção dos metamateriais.

Cavidade (Dimensões em mm)						
Código do elemento	$n$	$h$	$m$	$b_0$	$L$	$T$
A	2	32,5	15	2,9	49,1	3
I	2	32,5	15	2,9	49,1	3

Fonte: O Autor.

Os significados das dimensões são:  $n$  o número de enrolamentos,  $h$  a espessura da cavidade,  $m$  largura da célula no eixo  $x$ ,  $b_0$  espessura da parede,  $L$  comprimento no eixo  $y$  e  $T$  sendo a posição da perfuração no plano  $xy$ .

Os códigos de identificação dos painéis frontais utilizados, juntamente com suas dimensões, são apresentados na Tabela 8. A nomenclatura da amostra é obtida pela junção do código da cavidade com o código da tampa frontal. Essa nomenclatura será utilizada em todo o capítulo ao referir-se a qualquer resultado relacionado a ela.

Portanto, neste capítulo são apresentadas as análises dos principais resultados obtidos por meio dos experimentos, testes computacionais e análises analíticas, com o restante dos resultados apresentados sem comentários adicionais devido a similaridade no anexo A. Adicionalmente, é efetuada uma análise comparativa entre esses resultados, com o objetivo de tirar conclusões sobre os efeitos da presença de material poroso nas cavidades de um metamaterial com espaçamento enrolado.

### 4.1 ABSORÇÃO SONORA DOS MATERIAIS POROSOS NAS CAVIDADES DO METAMATERIAL

Para o preenchimento das cavidades internas durante o estudo, foram selecionados dois materiais amplamente utilizados em tratamentos acústicos: os absorventes porosos melamina e lã de PET. Esses materiais possuem propriedades adequadas para absorção de alta frequência. A Figura 23 apresenta uma comparação entre um metamaterial, melamina com espessura de 25 mm e lã de PET com 50 mm. A comparação evidencia a diferença de absorção apresentada por cada material nas frequências de até 1.000 Hz, onde os

Tabela 8 – Dimensões dos painéis frontais utilizados para a construção dos metamateriais.

Painéis Frontais ( Dimensões em mm)						
Código	Perfil	t	d	x	$d_f$	$L_f$
110161	Quadrado	2,9	-	1,6	-	-
110231	Quadrado	2,9	-	2,3	-	-
110281	Quadrado	2,8	-	2,8	-	-
110481	Quadrado	2,9	-	4,8	-	-
120232	Quadrado	2,9	-	2,3 e 3,55	-	-
120351	Quadrado	2,9	-	3,55 e 4,8	-	-
210181	Circular	3,1	1,8	-	-	-
210311	Circular	3,1	3,1	-	-	-
210571	Circular	2,9	5,7	-	-	-
310041	Fenda	2,9	-	-	0,4	5,9
310441	Fenda	2,9	-	-	0,7	4,4
310443	Fenda	3,1	-	-	2,1	4,4
310592	Fenda	2,9	-	-	0,6	5,9
310594	Fenda	3,1	-	-	1,8	5,9
310599	Fenda	3,1	-	-	1	5,9
310601	Fenda	3,1	-	-	1,8	5,9
310811	Fenda	2,9	-	-	0,53	8,13
310942	Fenda	2,9	-	-	0,4	9,4
310943	Fenda	3,1	-	-	0,65	9,4
420571	Multiplo	2,9	5,7	-	0,9	5,9

Fonte: O Autor.

materiais porosos mostram baixa absorção em comparação com o metamaterial labiríntico. No entanto, é possível notar que o metamaterial tem uma banda de absorção mais restrita, apresentando uma faixa de absorção de 50% de 167 Hz.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros acústicos macroscópicos da lã de PET e melamina, sendo possível perceber que ambos os materiais apresentam mesmos valores de porosidade e tortuosidade, mostrando diferenças apenas nos outros três parâmetros, resistividade ao fluxo, comprimento característico viscoso e térmico. No qual o parâmetro com maior influência para o comportamento acústico acaba sendo a resistência ao fluxo.

Tabela 9 – Parâmetros macroacústicos da lã de PET e melamina.

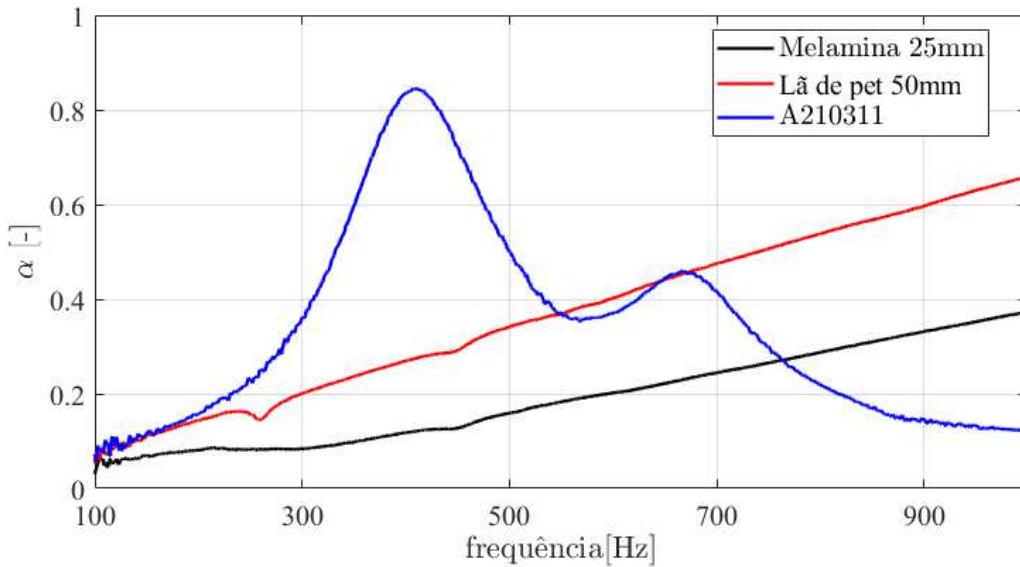
Material	$\phi$ [%]	$\alpha_\infty$ [-]	$\sigma_r$ [ $Ns \cdot m^{-4}$ ]	$\Lambda$ [ $\mu m$ ]	$\Lambda'$ [ $\mu m$ ]
Lã de PET	0,9	1,0	9227	362,1	362,2
Melamina	0,9	1,0	12627	91,0	148,0

Fonte: Kulakauskas (2016) e Barbosa *et al.* (2017).

## 4.2 ABSORÇÃO SONORA E POSIÇÕES DO MATERIAL POROSO NAS CAVIDADE DO METAMATERIAL

Como explicitado no Capítulo 3 foram utilizadas três posições para montagem do material poroso na cavidade do metamaterial para os testes e através delas buscou-se

Figura 23 – Comportamento do coeficiente de absorção sonora do metamaterial A210311 (perfuração circular e sem material poroso), da melamina e da lã de PET.



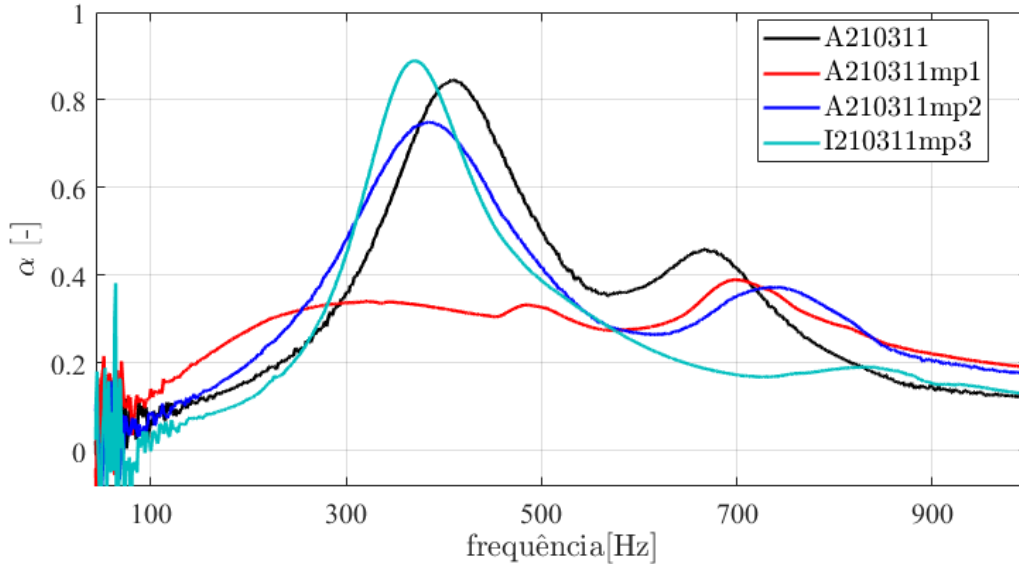
Fonte: O Autor.

resultados para as análises comparativas com os resultados numéricos, modelos teóricos e experimentais com foco na mudança de comportamento acústico desse novo absorvedor quando comparado ao seus metamateriais base.

A Figura 24 mostra o comportamento da absorção sonora do metamaterial híbrido com a adição de material poroso nas três posições possíveis. É possível distinguir algumas informações importantes, como o deslocamento dos picos de absorção de 370 Hz para a posição 3 e 383 Hz para a posição 2, quando comparado com o pico em 409 Hz do metamaterial base (A210311). Além disso, observa-se na curva da posição 1 que, dependendo da posição em que o absorvedor poroso é colocado, ele é capaz de eliminar a característica principal buscada no uso de um metamaterial: o pico focalizado com alta capacidade de absorção.

Outro ponto a ser considerado são os picos existentes em torno de 700 Hz. Esses picos de absorção são ocasionados por problemas na montagem da amostra. Em comparação ao diâmetro do tubo de impedância, a amostra apresenta uma diferença de 1 mm para garantir que qualquer erro de fabricação não impeça a realização dos testes. Essa pequena diferença de tamanho cria um espaço onde o ar fica preso, e com frestas devido ao modo de montagem geram um efeito próximo ao de um ressonador, aumentando a absorção em torno de 700 Hz. Durante o processo de testes esse problema foi corrigido para os testes posteriores através da adição de massa de calafetar para remover a fresta entre o material e o tubo de impedância, como evidenciado no resultado da amostra I210311mp3, que apresenta uma curva mais uniforme e conforme esperado.

Figura 24 – Comportamento do coeficiente de absorção sonora do metamaterial A210311 (perfuração circular e sem material poroso, valido a partir de 180 Hz) e da melamina nas posições 1 (frontal), 2 (intermediária) e 3 (posterior).



Fonte: O Autor.

#### 4.2.1 Material poroso na Posição 1 (frontal)

Para investigar os efeitos da adição de material poroso em metamateriais, adotou-se a abordagem de utilizar seções preenchidas por materiais porosos e comparar os efeitos com o metamaterial base.

Como as amostras de metamaterial apresentam várias características similares entre si, como o comportamento das curvas de absorção sonora, gerando um padrão de curva onde os níveis de absorção se mantêm uniforme com aproximadamente 10% de variação, portanto foi feita uma seleção dos resultados para representar cada tipo de perfuração (circular, quadrada e fenda) como área de entrada para a onda acústica no metamaterial. Esses resultados selecionados são analisados e apresentados no texto principal do trabalho, enquanto os resultados dos metamateriais restantes são apresentados no Anexo A.

##### 4.2.1.1 Amostra A110231 (Perfuração quadrada)

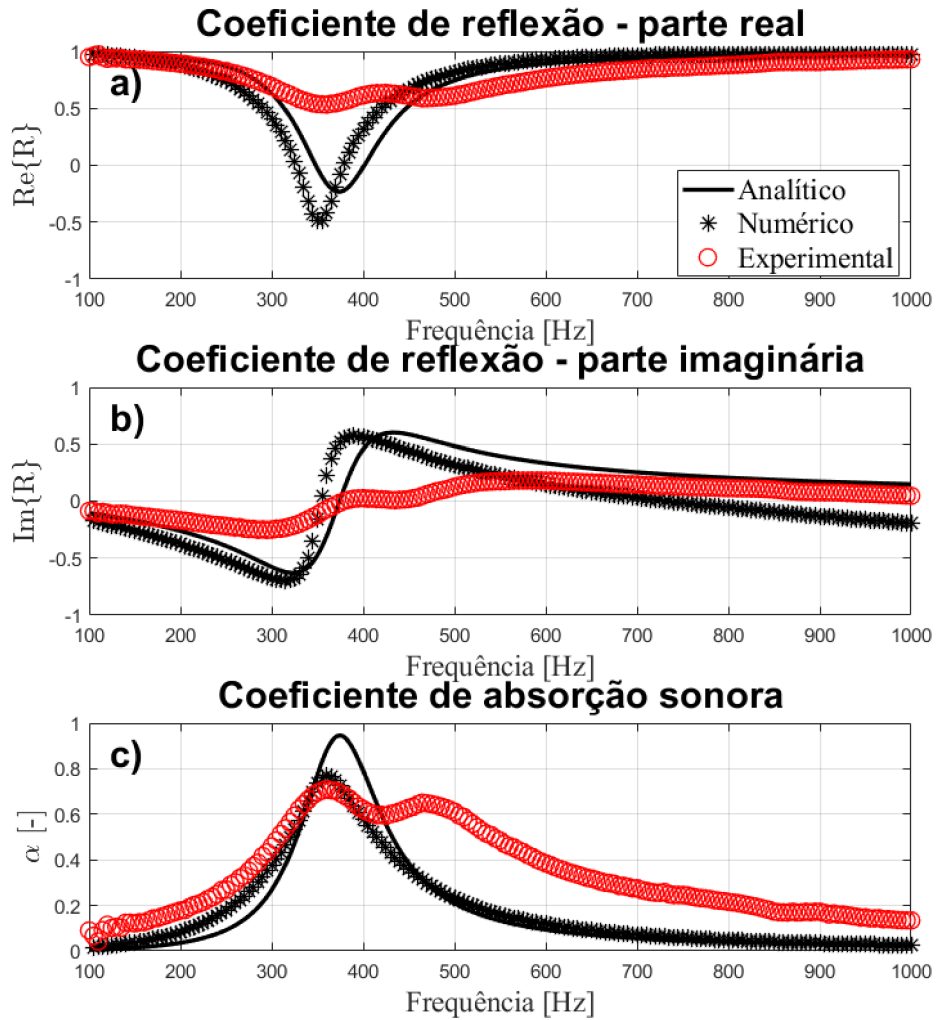
Os resultados analíticos, numéricos e experimentais da amostra A110231 sem material poroso estão apresentados na Figura 25. O resultado experimental de absorção sonora exibe um pico duplo devido a problemas de montagem da amostra no equipamento de teste, como explicado na seção 4.2, este problema foi corrigido na realização de testes em amostras futuras onde os resultados encontrados são mais coerentes e melhores quando comparados aos testes iniciais. Outro fator observado é que os picos de absorção, tanto nos resultados analíticos quanto nos numéricos, apresentam o pico de absorção próximo a 100%, enquanto a amostra experimental mostra absorção mais baixa, em torno de 70%.

Esses efeitos podem ser atribuídos à construção da amostra e aos materiais utilizados, uma vez que os materiais em si possuem porosidades e defeitos que impedem atingir as dimensões planejadas para o metamaterial, alterando assim o comportamento e resultando na falta de absorção nas frequências planejadas, além de gerar absorção em outras faixas de frequências que não são necessariamente de interesse. E essas peculiaridades não são previstas pelos modelos gerando tais discrepâncias.

A Figura 26 apresenta os resultados da amostra A110231mp1, que possui melamina como material poroso adicionado. A adição de uma camada de melamina após a perfuração tem como efeito a eliminação do pico característico de um metamaterial. Como indicado pelo coeficiente de reflexão na parte real, quase toda a energia sonora acaba sendo refletida em vez de absorvida pela amostra. Nesse caso, o material poroso age funcionalmente como uma parede rígida, impedindo a penetração da onda sonora no metamaterial, devido à maior resistência ao fluxo oferecida pela melamina. Os picos máximos de absorção nem sempre chegam a atingir 50% de absorção em nas análises. Nesse caso, ainda há uma pequena diferença entre os valores analíticos e numéricos quando comparados aos valores experimentais, devido às discrepâncias apresentadas pelo material que não estão presentes nos modelos teóricos. A adição de melamina introduz ainda mais fatores para gerar erros e discrepâncias, considerando que os modelos teóricos não preveem os possíveis problemas na instalação do material poroso no metamaterial gerados pelo corte e aplicação na cavidade, como por exemplo compressão devido a tamanhos não exatos, pequenos espaços de ar devido ao corte não totalmente plano, como o modelo analítico utilizado não considera esses erros são geradas diferenças, com maior tempo e análises pode-se melhorar o processo construtivo para diminuir esses problemas.

Na sequência, a Figura 27 apresenta os resultados com lã de PET. A lã de PET possui uma resistividade ao fluxo menor quando comparada à melamina, portanto, o metamaterial preenchido com ela apresenta um leve pico de absorção centrado em 370 Hz para os resultados teóricos e 330 Hz para o resultado experimental, quase atingindo 60% de absorção energética. Os resultados experimentais ainda mostram a que energia sonora apresenta ainda mais reflexão em comparação com os dados do metamaterial base, mas já é possível perceber que nessa posição de aplicação de metamaterial, o principal fator que determina a capacidade de absorção sonora é a resistividade ao fluxo do material aplicado. Se a resistividade for muito alta, a adição porosa age como uma parede rígida, e conforme ela diminui, permite a passagem da onda sonora, retomando a função de absorvedor. Novamente, as discrepâncias nos resultados experimentais em relação aos demais se devem possivelmente ao preparo das amostras, como colocação do material nas amostras e corte nas dimensões corretas, pois a lã de PET pode ser comprimida com grande facilidade no momento da aplicação de força no material, condição que os modelos teóricos não têm a capacidade de prever.

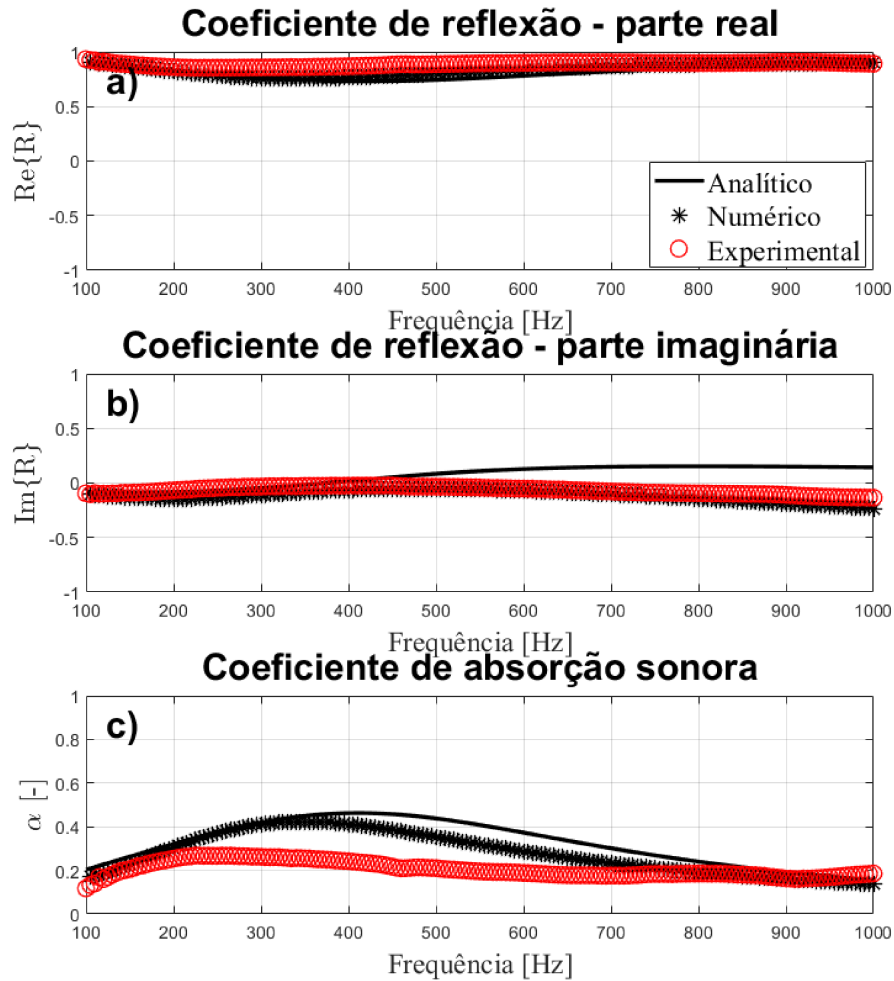
Figura 25 – Desempenho da amostra A110231 (metamaterial com perfuração quadrada e sem material poroso). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

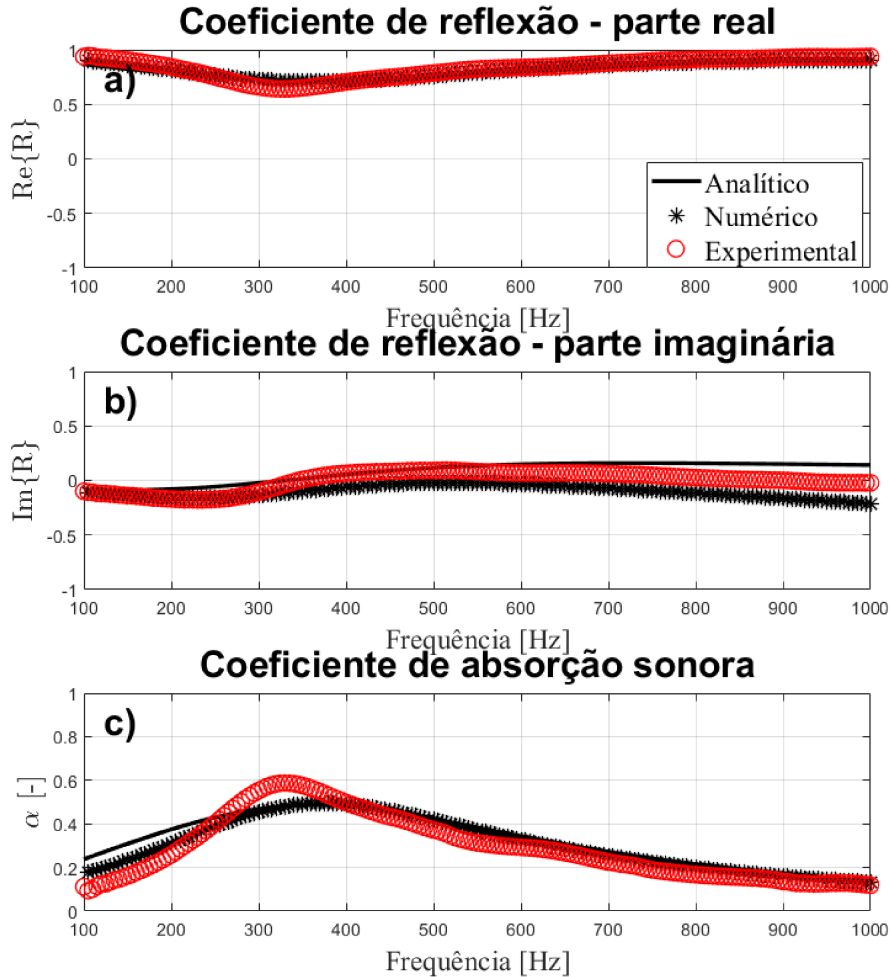


Figura 26 – Desempenho da amostra A110231mp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária.



Fonte: O Autor.

Figura 27 – Desempenho da amostra A110231lp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com la de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

A Tabela 10 apresenta uma síntese dos indicadores acústicos das curvas apresentadas. Vergara *et al.* (2022) utilizam um indicador que pode ser utilizado para descrever e avaliar a banda de atuação, definindo o valor médio do coeficiente de absorção ao longo de uma faixa de frequência específica. Neste caso, foi aplicada a faixa total de estudo, variando de 100 a 1.000 Hz. Este fator é utilizado em vez da usual faixa de frequência para absorção em 50% porque, nesta aplicação, há poucos resultados acima dos 50% de absorção.  $Q_\alpha$  pode ser descrito pela seguinte equação

$$Q_\alpha = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_i}^{f_f} \alpha(f) df. (41)$$

Os valores baixos de  $Q_\alpha$  representam a pequena faixa de frequência e os baixos níveis de absorção do metamaterial em estudo.

Utilizando o modelo numérico desenvolvido no software COMSOL, foi feito um

Tabela 10 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A110231 (metamaterial com perfuração quadrada).

	Amostra	Freq. Pico (Hz)	$\alpha$ máximo	$Q_\alpha$
Sem material poroso	Analítico	375	0,95	0,17
	Numérico	360	0,77	0,18
	Experimental	360	0,71	0,34
Melamina na pos. 1	Analítico	406	0,46	0,33
	Numérico	335	0,44	0,28
	Experimental	225	0,26	0,21
Lã de PET na pos.1	Analítico	362	0,49	0,33
	Numérico	370	0,58	0,31
	Experimental	330	0,58	0,29

Fonte: O Autor.

levantamento dos campos de pressão acústica, velocidade acústica e dissipação térmica dentro dos metamateriais analisados, na frequência de 400 Hz. As Figuras 28, 29 e 30 estão subdivididas em a, b e c, representando, respectivamente, a pressão acústica, a velocidade acústica e a dissipação térmica.

Na Figura 28a), está clara a divisão entre a parte externa e interna do metamaterial, demonstrando o diferencial de pressão existente quando próximo ao pico de absorção sonora. Na sequência, a parte b) apresenta a velocidade de partícula, na região da perfuração encontra-se o pico de aproximadamente  $0,25 \text{ m/s}$ . De acordo com Guo *et al.* (2020), é esperado que a camada em contato com a parede não apresente movimento e esteja em repouso devido aos fenômenos de cisalhamento. Na seção c), a dissipação térmica tem maior predominância de efeitos dissipativos na perfuração, onde efeitos termoviscosos atuam com mais intensidade.

Os mesmos efeitos podem ser visualizados nas Figuras 29 e 30 mesmo com a aplicação do material poroso (melamina) na parte interna do metamaterial, exceto que para esses casos a frequência do pico de absorção reduziu então a pressão acústica interna apresentada não apresenta mais os valores máximos.

Figura 28 – Desempenho da amostra A110231 (metamaterial com perfuração quadrada e sem material poroso) em 400 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].

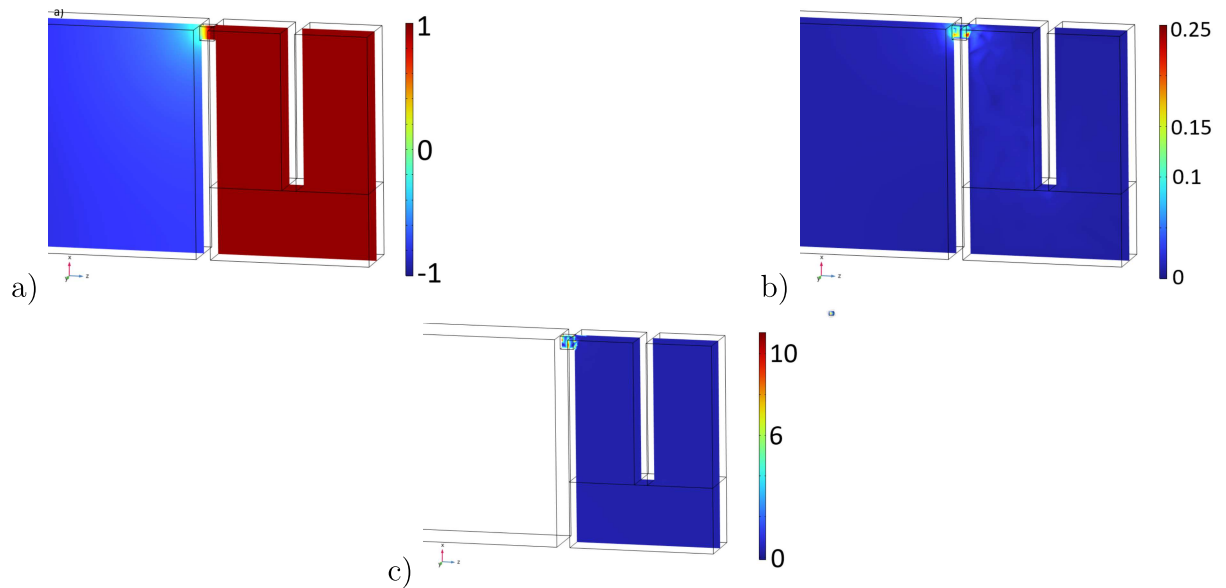


Figura 29 – Desempenho da amostra A110231mp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 1) em 400 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].

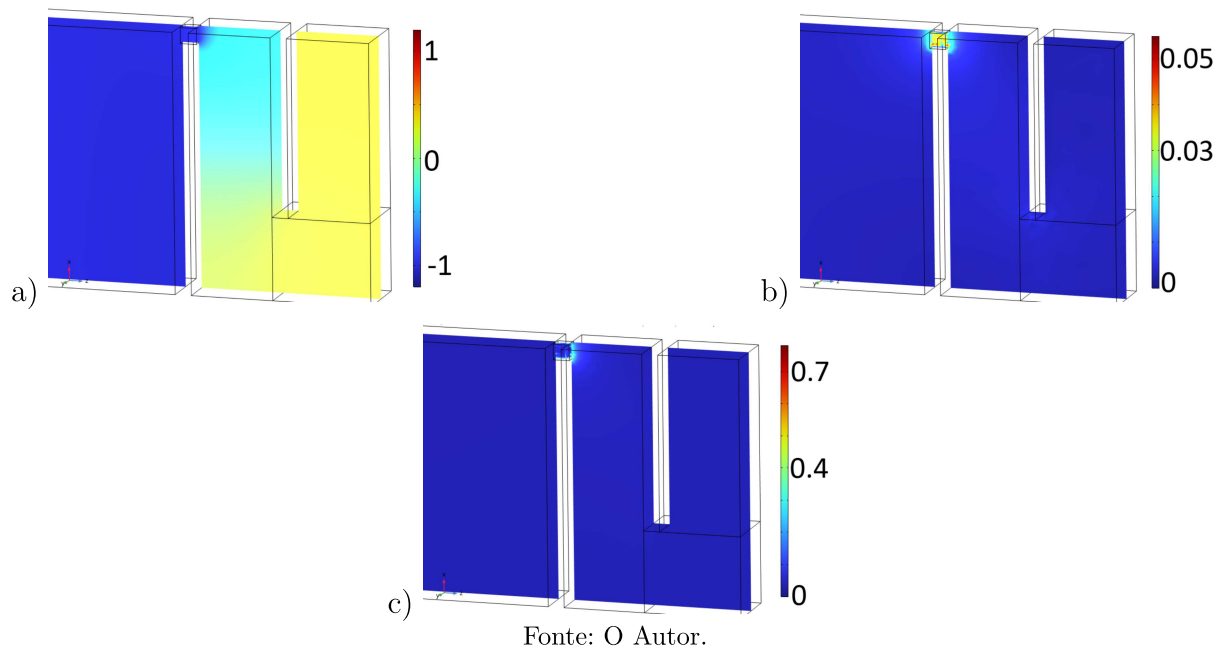
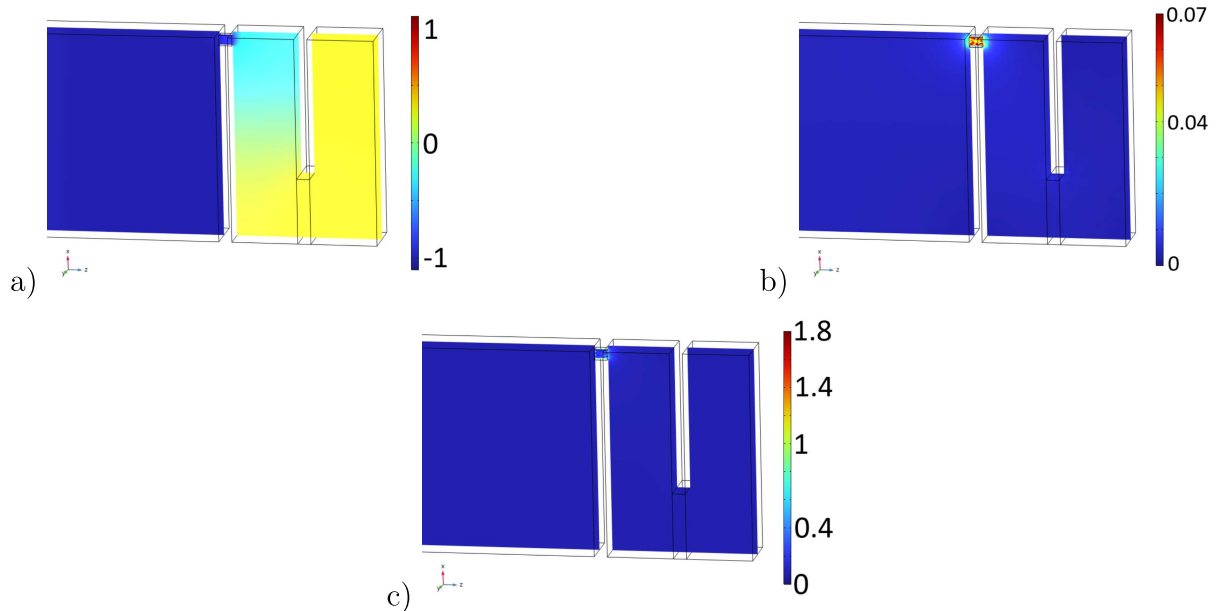


Figura 30 – Desempenho da amostra A110231lp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 1) em 400 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



Fonte: O Autor.

#### 4.2.1.2 Amostra A210311 (Perfuração circular)

Na Figura 31 estão destacados os resultados da amostra A210311 base, que servirá como comparação para as amostras com material poroso adicionado. Novamente, o resultado experimental apresenta um segundo pico de absorção, como já explicado anteriormente, esse pico secundário é proveniente da forma de montagem da amostra no tubo de teste. O valor máximo de absorção obtido a partir do experimento foi de 85%, enquanto os valores teóricos se aproximam de 100%. No entanto, há uma pequena diferença entre as frequências em que os máximos ocorrem: 395 Hz para o resultado analítico, 415 Hz para o experimental e 435 Hz no numérico.

Essas diferenças ocorrem porque os modelos numéricos e analíticos não conseguem prever totalmente as características reais do metamaterial, principalmente devido ao tipo de material utilizado na construção. Há uma porosidade intrínseca ao material (MDF) que os modelos não consideram, e também podem existir pequenas frestas na amostra devido à construção em camadas. Para reduzir essas diferenças, Cassetari (2023) utilizou uma impedância interna adicional para o metamaterial. Este método também é adotado neste trabalho para atingir uma melhor correlação do modelo teórico com o experimental, mas mesmo com essa técnica ainda há diferenças.

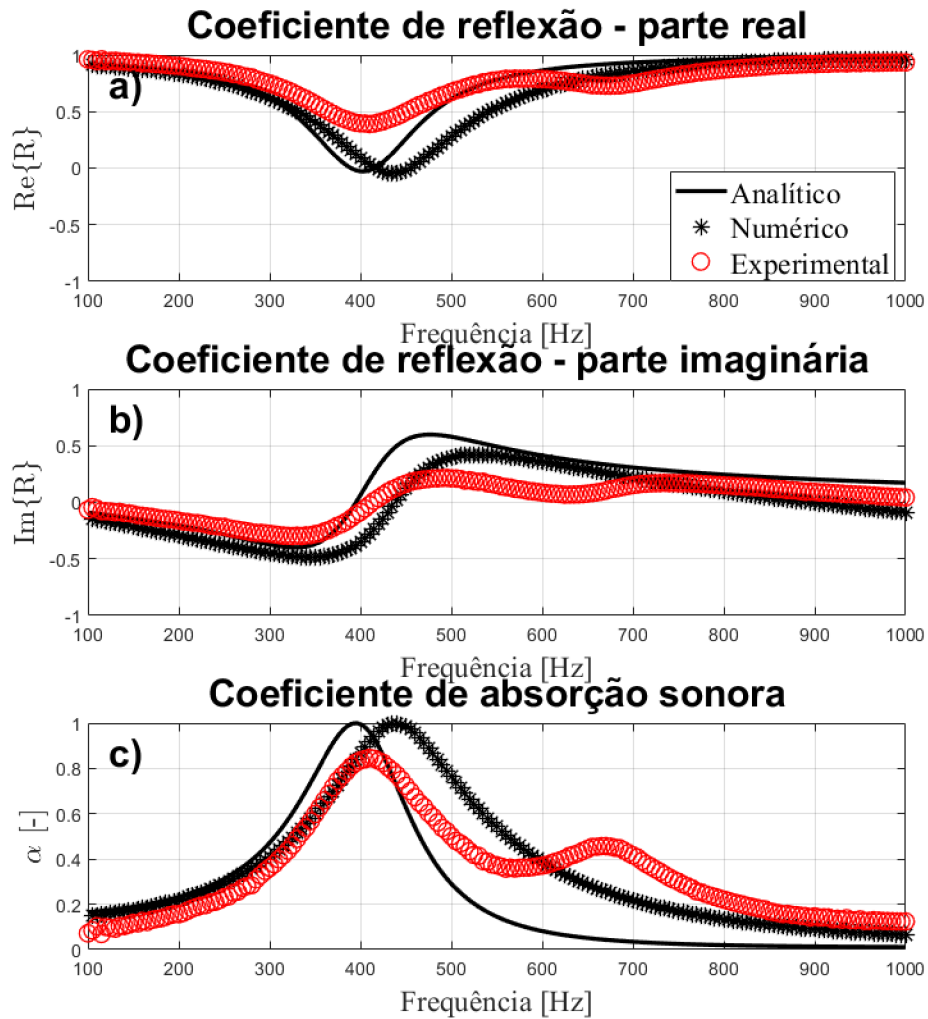
A Figura 32 apresenta os resultados analíticos, numéricos e experimentais para o metamaterial A210311mp1, onde é aplicada a melamina na primeira posição. Os modelos numérico e analítico deixam de apresentar um pico de absorção claro, mostrando um alargamento da banda de frequência de absorção, porém com o valor máximo reduzido para

55% em 410 Hz. Enquanto a amostra experimental utilizada apresenta uma queda ainda mais brusca nos valores de absorção, alcançando um valor máximo de 34%. É possível perceber que esse efeito na amostra experimental é causado principalmente pelo alto coeficiente de reflexão; quase toda a energia sonora é refletida em vez de ser absorvida pelo metamaterial, tornando-se semelhante a uma parede rígida quando o valor da resistividade ao fluxo do material poroso aplicado é elevado o suficiente.

Na Figura 33 estão os resultados para o metamaterial com lã de PET. Quando aplicada internamente a lã de PET, o pico de absorção volta a ser mais claro, ainda apresentando um alargamento significativo tanto nos modelos teóricos quanto no resultado experimental. O pico agora está em torno de 465 Hz para os modelos teóricos, com absorção máxima sendo 64%. No modelo experimental, a frequência do valor máximo de absorção passa para 365 Hz, com um pico de 66% de absorção sonora.

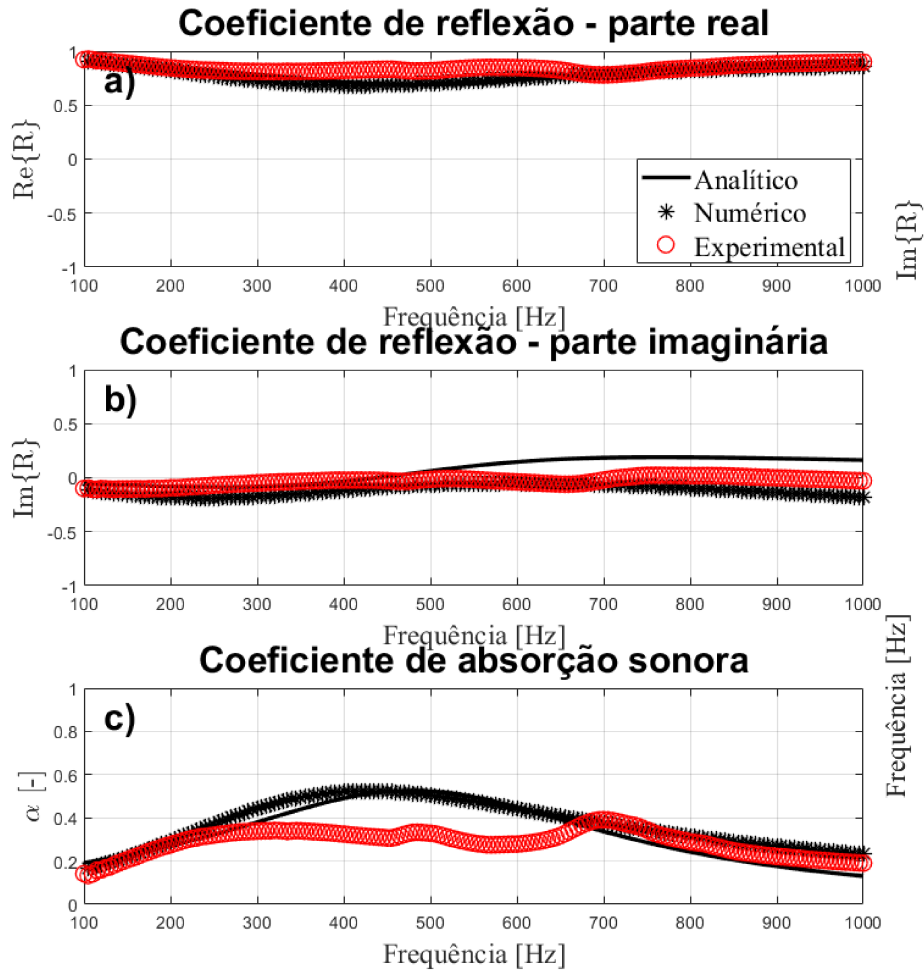
Neste caso, há uma diferença de 100 Hz entre o pico de absorção experimental e os modelos numérico e analítico. A hipótese levantada para essa diferença entre os picos é que, principalmente devido à montagem do material poroso na parte interna, é um processo onde é fácil apresentar compressão do material poroso, gerando assim a possibilidade de pequenas frestas que levariam o funcionamento do metamaterial mais próximo aos valores onde o material poroso não estaria aplicado. Ainda é possível perceber pelas curvas que há uma boa relação entre as curvas teóricas e experimentais, apesar dessas pequenas diferenças geradas pelas incertezas dos testes experimentais.

Figura 31 – Desempenho da amostra A210311 (metamaterial com perfuração circular e sem material poroso). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

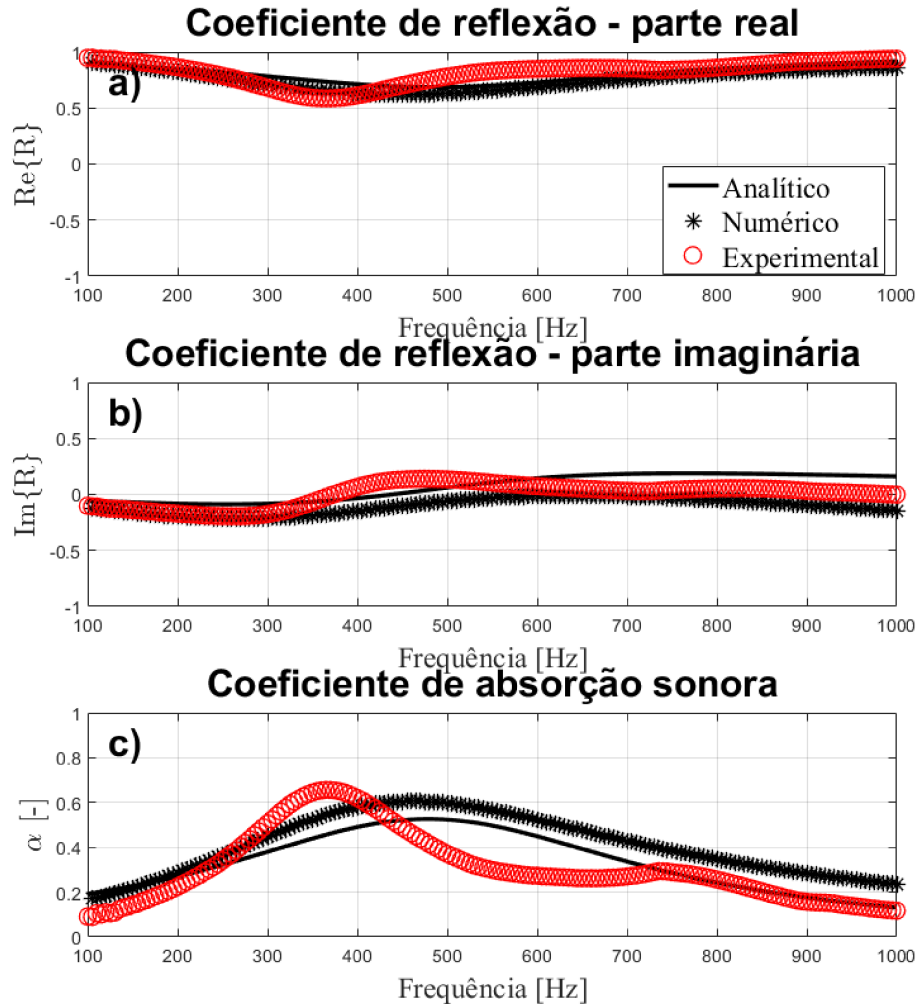
Figura 32 – Desempenho da amostra A210311mp1 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.



Figura 33 – Desempenho da amostra A210311lp1 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

A Tabela 11 apresenta uma síntese dos resultados para o absorvedor A210311 com melamina e lã de PET na posição 1 (frontal). Nela estão também os valores de  $Q_\alpha$  para que possa ser feita a comparação de absorção de banda larga apresentado pelo metamaterial. Neste caso, os melhores resultados dos modelos propostos são presentes no modelo com lã de PET, apresentando valores teóricos de  $Q_\alpha$  até 0,42 no modelo numérico. No entanto, deve-se lembrar que o pico de  $\alpha$  cai drasticamente, reduzindo a capacidade de absorção.

Com os modelos numéricos, é possível gerar os campos de pressão, velocidade de partícula e dissipação energética do metamaterial em estudo. As Figuras 34 e 35 apresentam esses campos para as amostras A210311mp1 e A210311lp1 a 450 Hz, frequência próxima do pico de absorção. Com elas, é possível notar que os valores máximos de pressão sonora não estão presentes dentro do metamaterial nesta frequência, mas sim os valores mínimos (um vale) na parte externa. Há uma diferença entre a seção com material poroso e a

Tabela 11 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A210311 (metamaterial com perfuração circular).

	Amostra	Freq. Pico (Hz)	$\alpha$ máximo	$Q_\alpha$
Sem material poroso	Analítico	395	0,99	0,24
	Numérico	435	0,97	0,36
	Experimental	415	0,85	0,35
Melamina na pos. 1	Analítico	476	0,53	0,34
	Numérico	410	0,55	0,38
	Experimental	325	0,34	0,29
Lã de PET na pos. 1	Analítico	482	0,53	0,34
	Numérico	465	0,64	0,42
	Experimental	365	0,66	0,31

Fonte: O Autor.

seção com apenas ar, a seção com material poroso apresenta influências causadas pela pressão apresentada na parte externa, que representa o tubo de impedância, e apresenta um aumento gradual na pressão até que ela se iguale à pressão da parte interna de ar.

Ainda a partir dessa figura na seção b), é possível notar que a velocidade de partícula é baixa basicamente por todo o metamaterial, apresentando apenas na perfuração uma velocidade considerável. No entanto, quando comparada à velocidade na região quando o metamaterial não apresenta o material poroso, é muito baixa, os valores máximos ficando em torno de 30% dos máximos originais. E, por fim, a seção c) apresenta a dissipação de energia. É possível notar que os valores mais elevados novamente se encontram na perfuração de entrada próxima aos cantos na parte interna, onde há naturalmente mais dissipação devido aos efeitos termoviscosos.

Quando comparando as figuras entre si, elas apresentam as mesmas características físicas, porém a Figura 35, que representa o metamaterial com lã de PET, apresenta maiores valores de velocidade e dissipação térmica na perfuração de entrada devido à menor resistividade ao fluxo que a lã de PET possui.

Figura 34 – Desempenho da amostra A210311mp1 a 450 Hz (metamaterial com circular quadrada e com melamina na posição 1). a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].

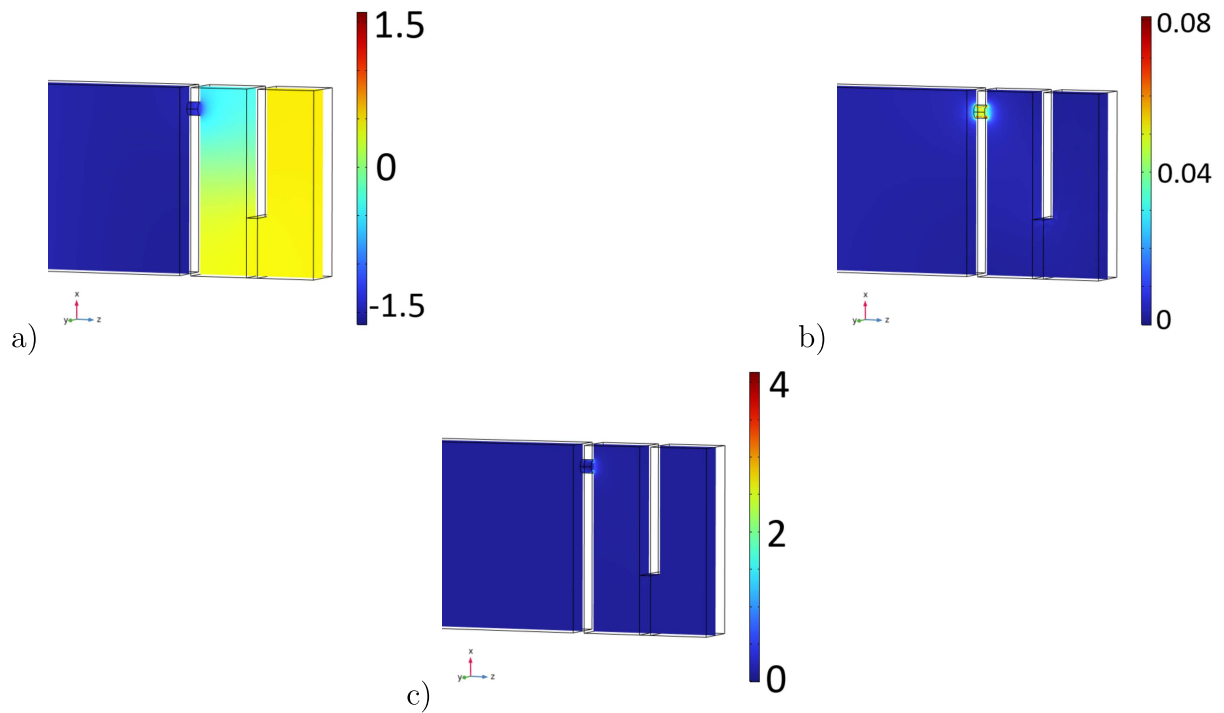
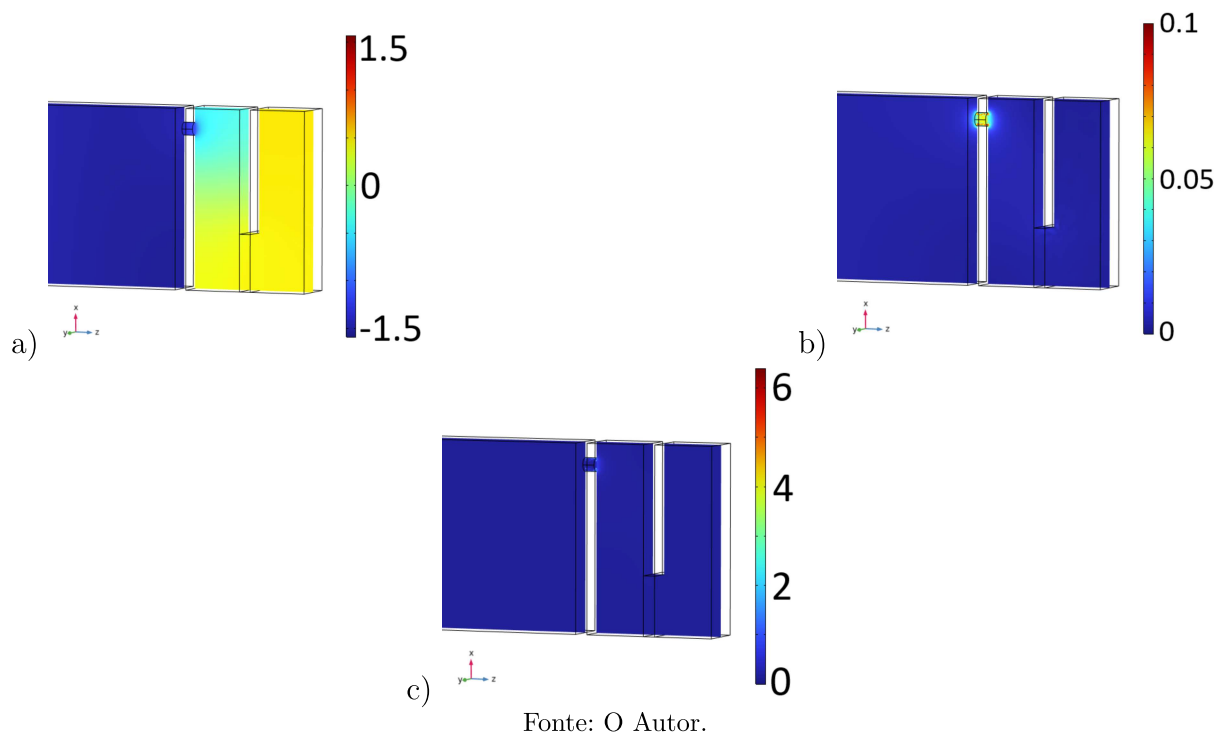


Figura 35 – Desempenho da amostra A210311lp1 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 1) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



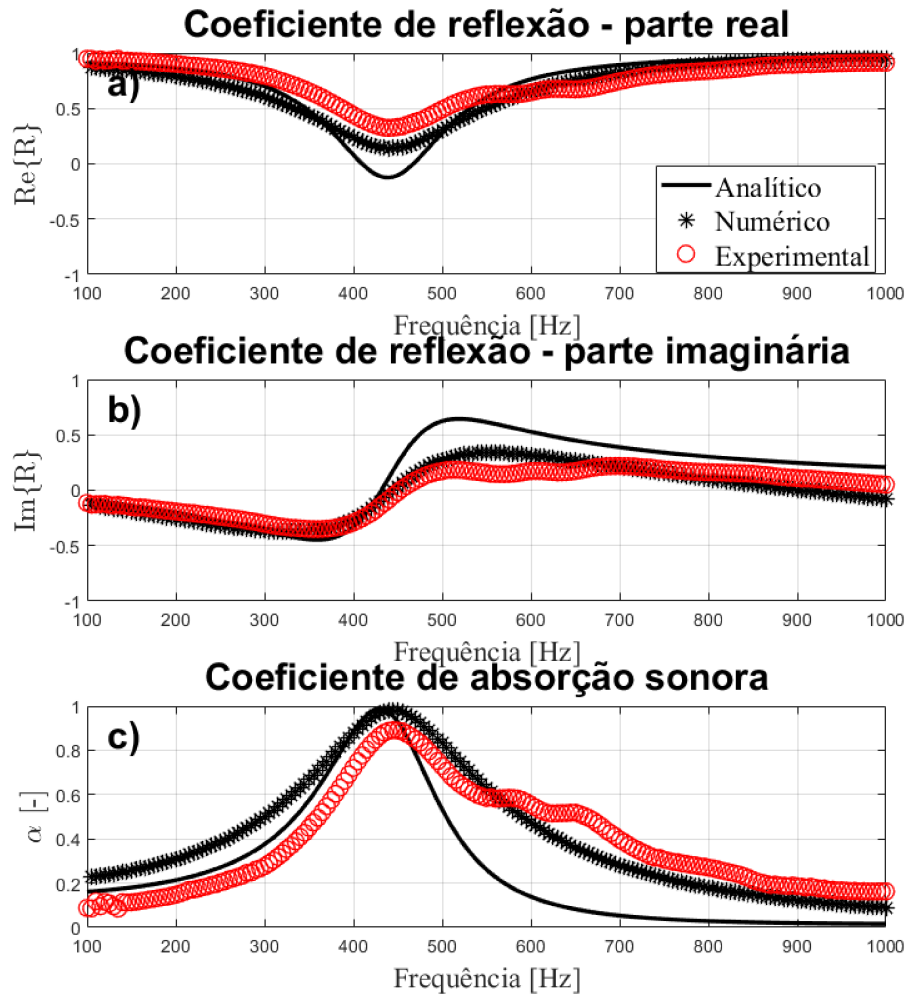
#### 4.2.1.3 Amostra A310594 (Perfuração fenda)

A Figura 36 representa os resultados do metamaterial A310594 base, ou seja, sem nenhum material poroso na parte interna, e servirá como ponto inicial de comparação para os metamateriais com perfuração de tipo fenda. Novamente, devido aos problemas de montagem, há valores elevados entre as frequências de 600 a 700 Hz, devido aos efeitos anteriormente explicados. Os valores dos picos ficam em torno de 440 Hz, onde o máximo de absorção para os resultados teóricos é de 99%, e para o experimental é de 89%. Ainda com o resultado experimental dando validação para os resultados analítico e numérico.

A Figura 37 contém os resultados com a aplicação de melamina na posição 1 do metamaterial. Continuando com a tendência já apresentada nos outros dois tipos de perfuração, ocorre o achatamento da curva de absorção e alargamento da banda de frequência. No entanto, a redução do valor máximo de absorção é muito grande, o que faz com que o efeito esperado de um metamaterial, ou seja, o pico de absorção elevado em uma faixa de frequência específica, seja basicamente inexistente nesta amostra. Novamente, os resultados experimentais mostram que o material apresenta um funcionamento como uma parede rígida quando aplicada melamina na posição 1 (frontal).

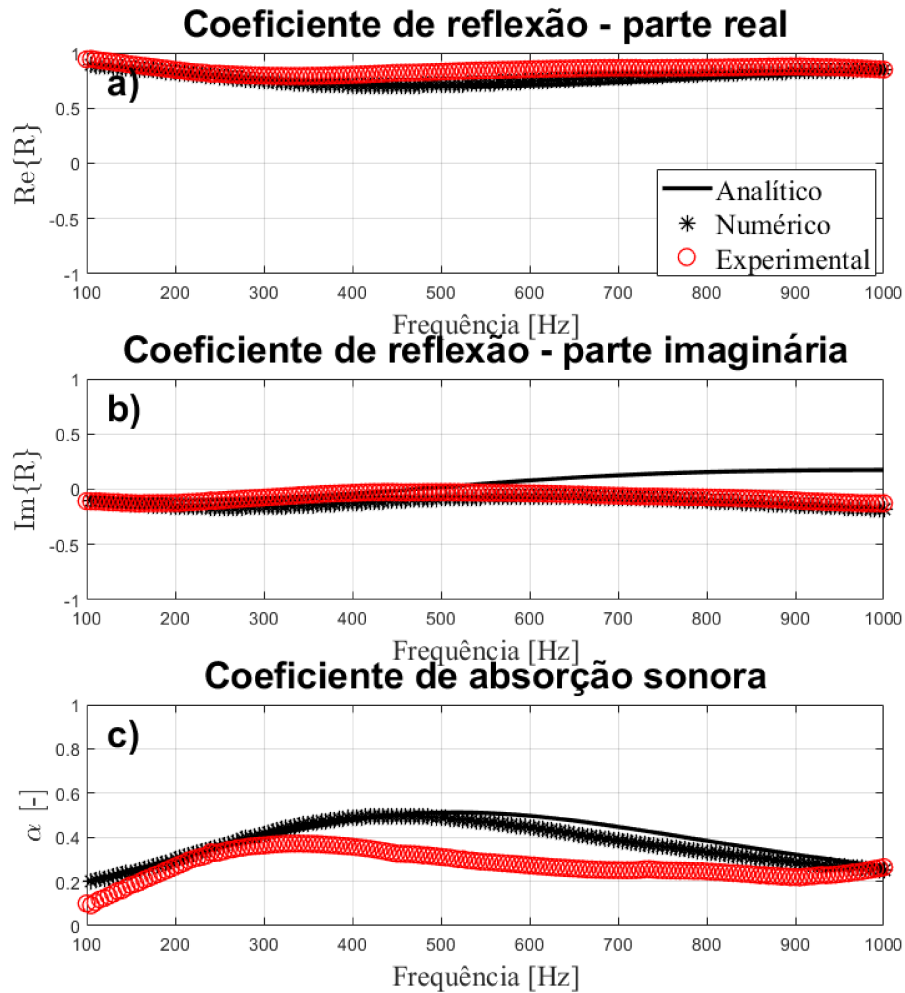
Na Figura 38 estão os resultados quando aplicada lã de PET. Esta segue também a tendência já apresentada nos outros tipos de perfuração devido ao menor valor de resistividade ao fluxo. Apresentando um pico de absorção mais elevado quando comparado à amostra com melamina, sendo em torno de 740 Hz para os valores teóricos e 415 Hz para os experimentais, e absorção de 0,6 e 0,68 para os resultados teóricos e experimentais, respectivamente. Essas diferenças apresentadas são novamente devido às incertezas existentes nos resultados experimentais, sendo que há uma grande quantidade de pequenas diferenças possíveis que não são consideradas nos modelos teóricos, resultando em uma diferença entre os resultados. No entanto, quando observada a curva de absorção, ela está coerente entre os resultados. Com a lã de PET aplicada, os valores experimentais do coeficiente de reflexão já não se aproximam tanto dos máximos na parte real, onde o material poroso aplicado na amostra não age mais como uma parede rígida, apresentando assim um pico de absorção.

Figura 36 – Desempenho da amostra A310594 (metamaterial com perfuração fenda e sem material poroso). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



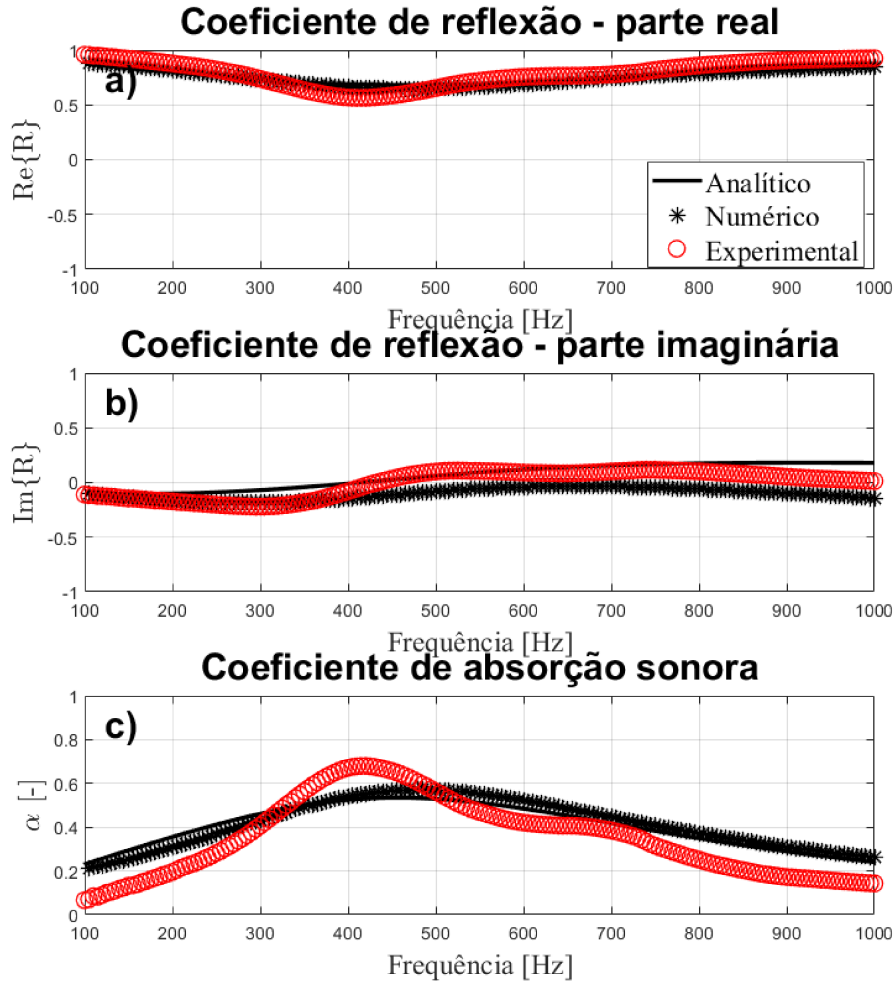
Fonte: O Autor.

Figura 37 – Desempenho da amostra A310594mp1 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Figura 38 – Desempenho da amostra A310594lp1 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Portanto, uma síntese dos resultados é apresentada na Tabela 12, incluindo o  $Q_\alpha$  para comparação. O  $Q_\alpha$  é utilizado para toda a faixa de frequência estudada, ou seja, é aplicado entre 100 e 1.000 Hz. Novamente, os melhores valores de  $Q_\alpha$  estão presentes nos resultados de lã de PET para esta posição de aplicação de material poroso interno, mesmo com a diferença no tipo de perfuração. Ainda assim, os valores do metamaterial base podem ser considerados os melhores para aplicação, pois a diferença no  $Q_\alpha$  entre eles e com lã de PET não é grande. No entanto, a amostra base apresenta uma absorção máxima muito mais elevada, de 0,99 comparada a 0,6 nos resultados teóricos e 0,89 para 0,68 nos valores experimentais.

Os campos de pressão, velocidade acústica e dissipação térmica foram avaliados novamente a partir do modelo numérico do metamaterial na frequência de 450 Hz e estão apresentados nas Figuras 39 e 40. A seção a) de cada figura apresenta o diferencial de pressão existente no metamaterial. Independente do material poroso aplicado, a pres-

Tabela 12 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A310594 (metamaterial com perfuração tipo fenda).

	Amostra	Freq. Pico (Hz)	$\alpha$ máximo	$Q_\alpha$
Sem material poroso	Anaítico	430	0,99	0,26
	Numérico	445	0,98	0,42
	Experimental	445	0,89	0,38
Melamina na pos. 1	Anaítico	512	0,51	0,40
	Numérico	440	0,52	0,38
	Experimental	340	0,37	0,28
Lã de PET na pos. 1	Anaítico	452	0,53	0,41
	Numérico	475	0,6	0,43
	Experimental	415	0,68	0,35

Fonte: O Autor.

são interna apresenta as mesmas características de distribuição do campo de pressão, começando com um valor aproximado da pressão externa e tendo um incremento suave inicialmente devido à presença do material poroso até atingir o valor da cavidade de ar do metamaterial. A parte b), representando a velocidade acústica, mostra que os maiores valores são encontrados novamente dentro da perfuração de entrada, onde a estrutura com o material poroso de menor resistividade ao fluxo apresenta velocidade mais elevada. E, por fim, a seção c) apresenta a dissipação de energia do metamaterial, onde a Figura 40 c) possui maiores valores de dissipação quando comparada à Figura 39 c), devido à maior velocidade apresentada na perfuração.



Figura 39 – Desempenho da amostra A310594mp1 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 1) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].

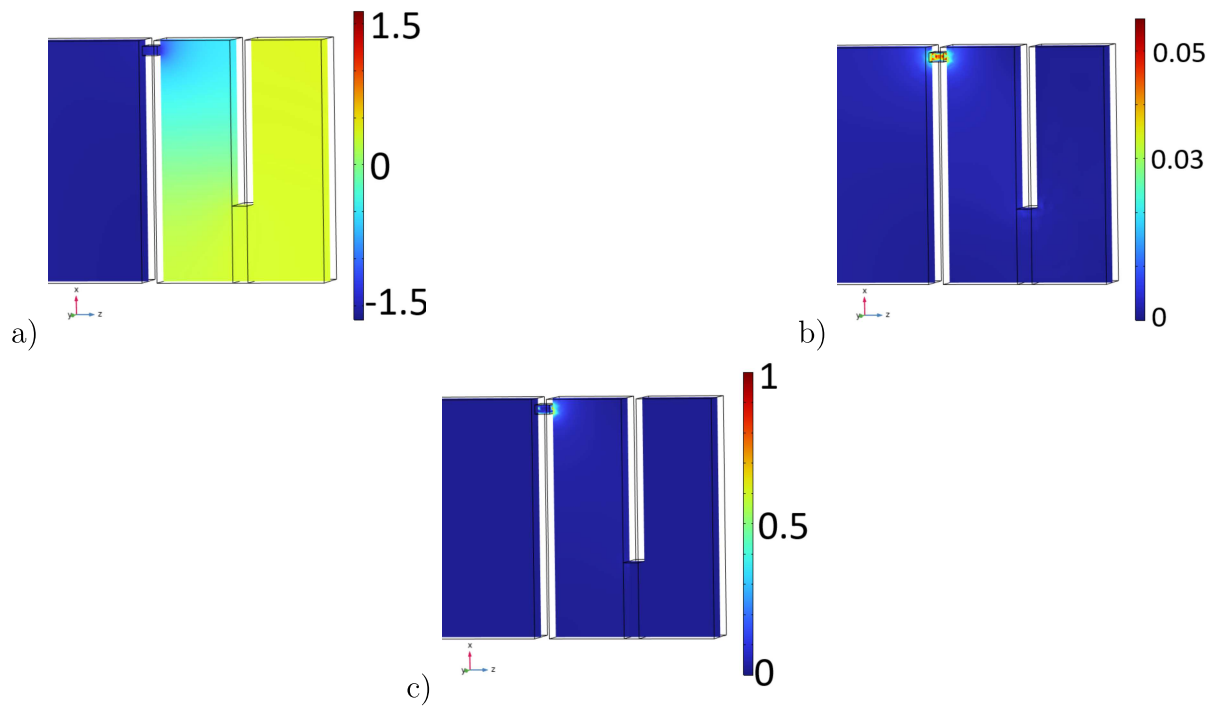
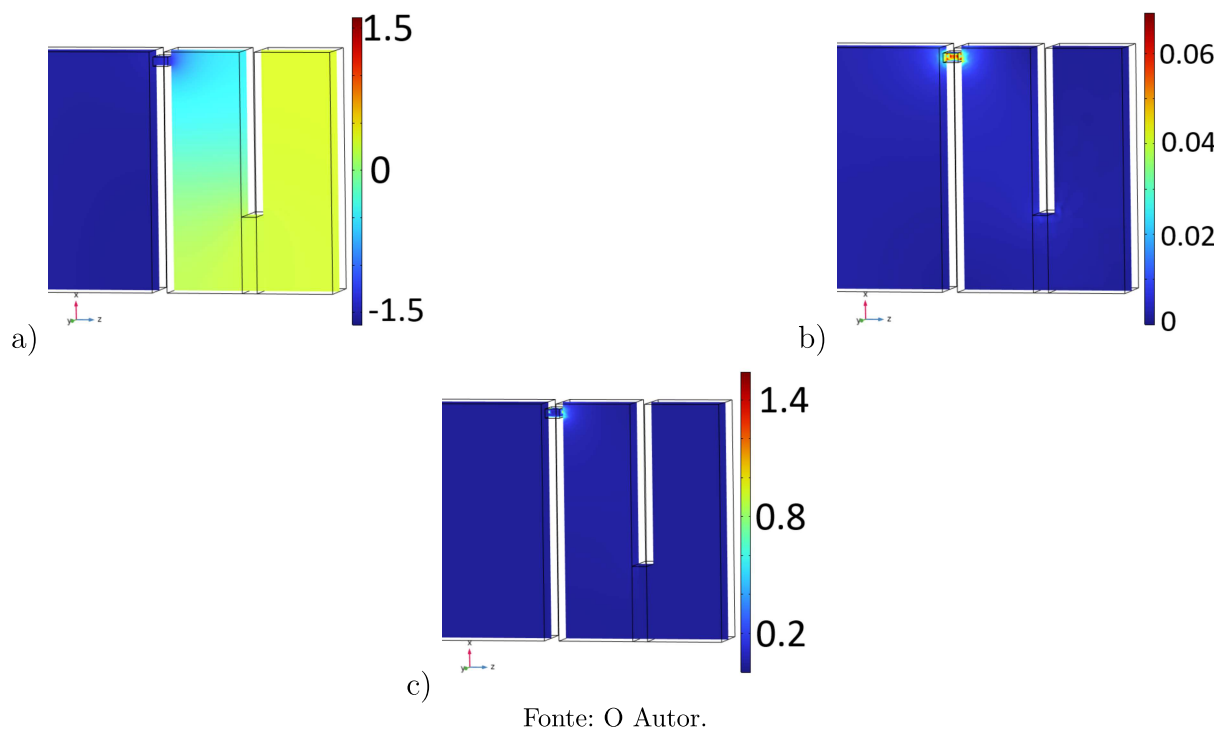


Figura 40 – Desempenho da amostra A310594lp1 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 1) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



#### 4.2.1.4 Síntese preliminar sobre o material poroso na posição 1 (frontal)

Fica claro com esta seção que a posição 1 não é a mais ideal para aplicação de materiais porosos em metamateriais de espaço enrolado. Independente do tipo de perfuração, foi gerada uma redução drástica na absorção sonora apresentada por cada amostra utilizada. O achatamento da curva de absorção gerado torna desnecessária a utilização de absorvedor ressonante como um metamaterial, isto porque a aplicação apenas do material poroso apresentaria características de absorção semelhantes e provavelmente com melhores valores na faixa de estudo quando se trata de material poroso com alta resistividade ao fluxo.

Com a lã de PET apresentando menor resistividade ao fluxo, os resultados foram relativamente melhores, porém ainda deixando a desejar, pois a característica principal de alta absorção em uma determinada faixa de frequência apresentada por um absorvedor do tipo ressonador, como no caso deste metamaterial, é reduzida em busca de uma banda de frequência de absorção maior, mas as perdas na absorção máxima são grandes e deixam a desejar.

A utilização do parâmetro  $Q_\alpha$  tornou-se necessária nesta seção, uma vez que o método mais comum de medir a largura de frequência de um determinado metamaterial é a banda de 50% de absorção, um fator praticamente inexistente nestes resultados devido à falta de resultados que superam os 50% de absorção sonora.

As discrepâncias entre os modelos teóricos e experimentais podem ser explicadas pela impossibilidade de contabilizar todas as variáveis presentes nas amostras dos experimentos. Além disso, existem diferenças entre os modelos aplicados, isto porque, para o experimento, é necessário criar uma amostra para tubo circular. Ao contrário dos modelos teóricos, que consistem em apenas uma célula de metamaterial, a amostra experimental é composta por várias células do metamaterial, as quais podem exercer influência umas sobre as outras, gerando discrepâncias nos resultados em comparação com os modelos teóricos.

#### 4.2.2 Análise dos resultados na Posição 2 (intermediária)

Nesta configuração de preenchimento, a cavidade do metamaterial fica dividida em duas, com o material poroso na seção intermediária, essa posição faz com que o material poroso adicionado possua um comprimento total menor do que nas posições 1 (fronta) e 3 (posterior), o comprimento do material poroso é apenas de 32,2 *mm* ao invés dos 46,2 *mm* presentes nas outras posições do material absorvente poroso, apesar disso os resultados encontrados continuando gerando as modificações das características acústicas do metamaterial desejadas, como aumento da largura de banda de absorção e redução da frequência do pico de absorção. Como na seção anterior, os resultados são semelhantes entre cada tipo de perfuração, então foi destacado um resultado para cada perfuração

(quadrado, circular e fenda).

As figuras com o material base são as mesmas já apresentadas (Figuras 25, 31 e 36), pois o metamaterial base não é alterado, apenas a posição de inclusão do material poroso é modificada.

#### 4.2.2.1 Amostra A110231 (Perfuração quadrada)

A Figura 41 apresenta os resultados analíticos, numéricos e experimentais obtidos para a amostra A110231mp2. Na figura, é possível observar uma faixa de absorção 50% maior em comparação com o metamaterial base, partindo de 130 Hz para 150 Hz, representando um aumento de aproximadamente 15%. Entretanto, esse incremento está associado a uma leve redução no valor máximo de absorção. O valor base, que inicialmente estava em torno de 99% nos modelos teóricos e 71% nos experimentais, passa para 98% e 67%, respectivamente, nos novos resultados teóricos e experimentais.

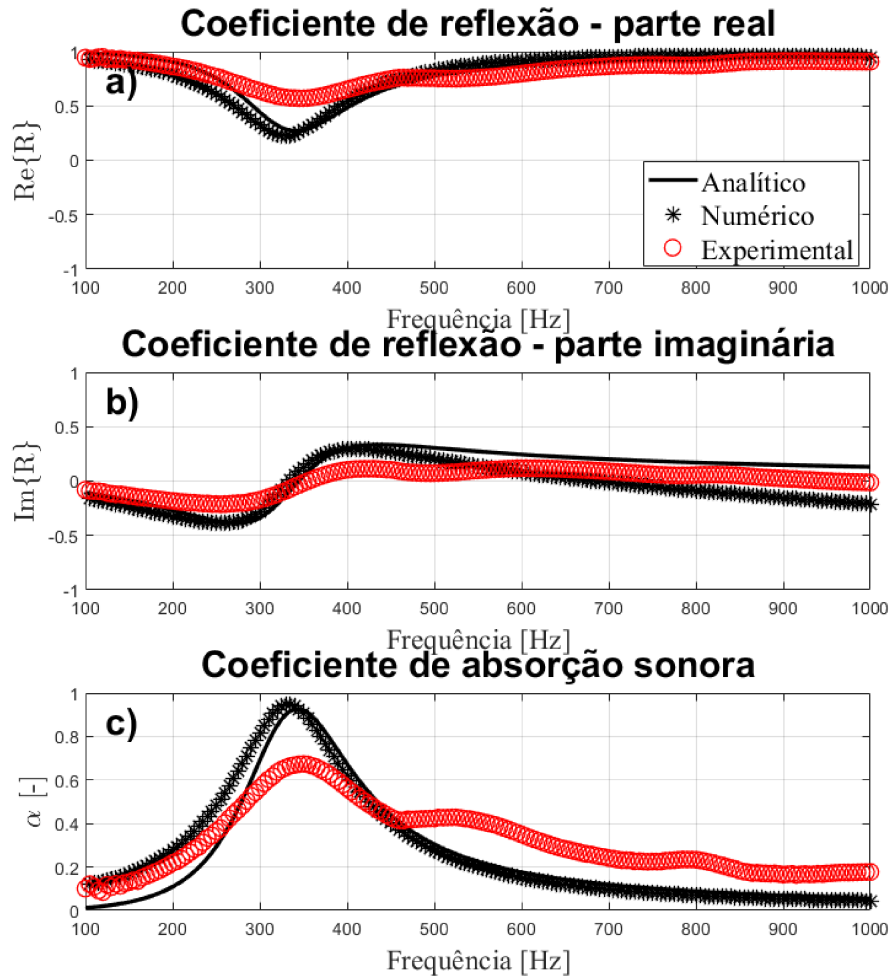
É importante notar as diferenças nas frequências de pico de absorção entre os modelos teóricos e a amostra experimental. Essas discrepâncias podem ser atribuídas às incertezas presentes nos resultados experimentais, que não são consideradas na elaboração dos modelos matemáticos. As imperfeições nas amostras experimentais também contribuem para a não conformidade com o valor máximo do pico de absorção.

Enquanto a impedância adicional gerada pela amostra porosa na parte intermediária do metamaterial é a responsável pelo aumento da banda, diminuição do pico de absorção máximo e modificação da frequência em que esse pico se encontra.

Na Figura 42, apresentam-se os resultados para a amostra contendo lã de PET na posição 2. Em comparação com o metamaterial base, as frequências dos picos para A110231p2 mostram mudanças mínimas quando contrastadas com a amostra contendo melamina. Os picos reduzem de 375 Hz para 370 Hz nos resultados teóricos e alcançam 340 Hz nos resultados experimentais. Apesar dessas alterações nas frequências, os valores máximos permanecem bastante próximos. No entanto, a faixa de frequência de 50% para os resultados numéricos aumenta para 200 Hz, enquanto essa mudança não é observada nos resultados experimentais, mantendo-se constante em 130 Hz.

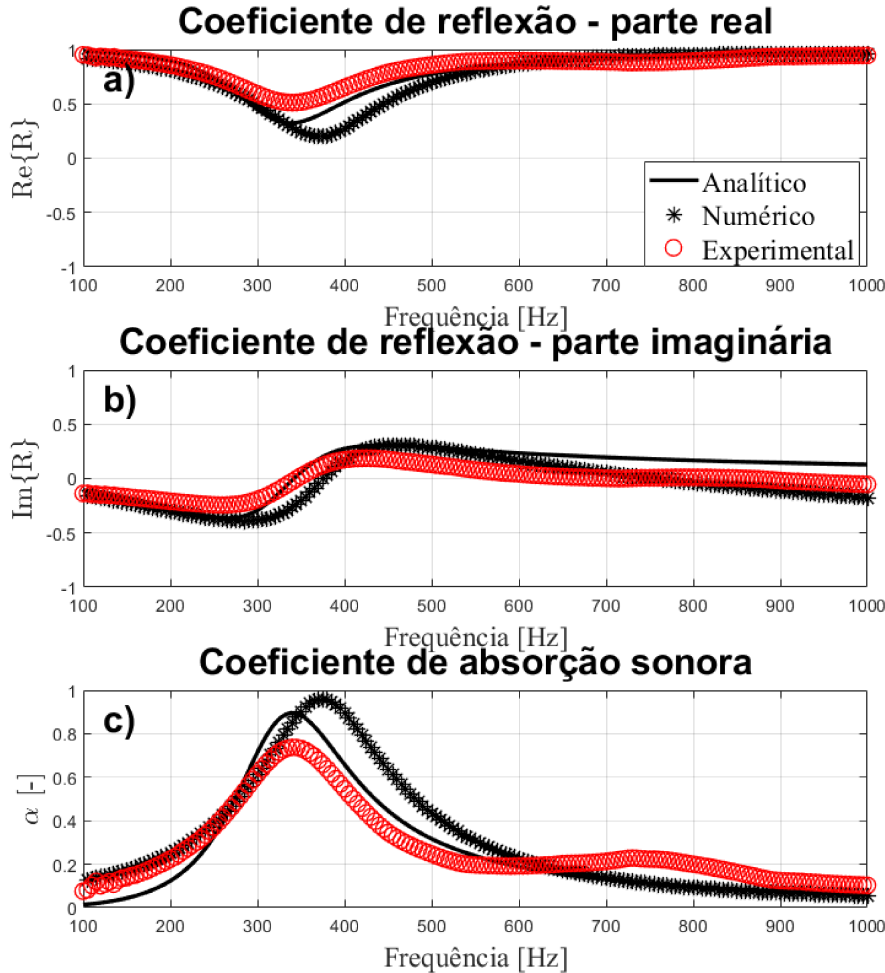
Uma hipótese para a ausência de alteração na faixa de 50% nos resultados experimentais é a possibilidade de frestas onde o material poroso foi adicionado, diminuindo a eficácia do absorvedor poroso em comparação com os resultados teóricos. Apesar de apresentar uma resistência ao fluxo menor em comparação com a melamina, a lã de PET ainda produz resultados satisfatórios na posição 2. Outro ponto a ser destacado é a redução dos picos entre 600 e 700 Hz nas amostras, indicando melhorias na montagem da amostra no equipamento de teste.

Figura 41 – Desempenho da amostra A110231mp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 2) . a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Figura 42 – Desempenho da amostra A110231lp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Para facilitar a comparação entre os dados apresentados, elaboramos a Tabela 13, que inclui as informações sobre a frequência do pico de absorção máximo, o valor máximo de absorção sonora e o  $Q_\alpha$ . Observamos que o  $Q_\alpha$  para toda a faixa de frequência analisada permanece muito próximo dos valores originais. Isso se deve principalmente ao fato de que o pico máximo diminui e a banda de frequência aumenta, fatores essenciais considerados no cálculo desse parâmetro.

A partir dos modelos numéricos, foram construídos os campos de pressão acústica, velocidade acústica e dissipação térmica nas amostras estudadas na frequência de 450 Hz. Esses campos podem ser visualizados nas Figuras 43 e 44. Mais uma vez, na seção a) das figuras, observamos a separação das pressões internas do metamaterial com as pressões externas na perfuração de entrada, onde a pressão interna se torna mais elevada do que a pressão externa. Nessa posição, é possível perceber o gradiente de pressão aumentando até atingir o valor máximo após a camada de material poroso, conforme evidenciado em

Tabela 13 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A110231 (metamaterial com perfuração quadrada).

Amostra	Freq. Pico (Hz)	$\alpha$ máximo	$Q_\alpha$	
Sem material poroso	Analítico	375	0,95	0,17
	Numérico	360	0,78	0,18
	Experimental	360	0,71	0,34
Melamina na pos. 2	Analítico	344	0,93	0,25
	Numérico	330	0,98	0,25
	Experimental	350	0,67	0,32
Lã de PET na pos. 2	Analítico	340	0,90	0,26
	Numérico	370	0,98	0,28
	Experimental	340	0,74	0,27

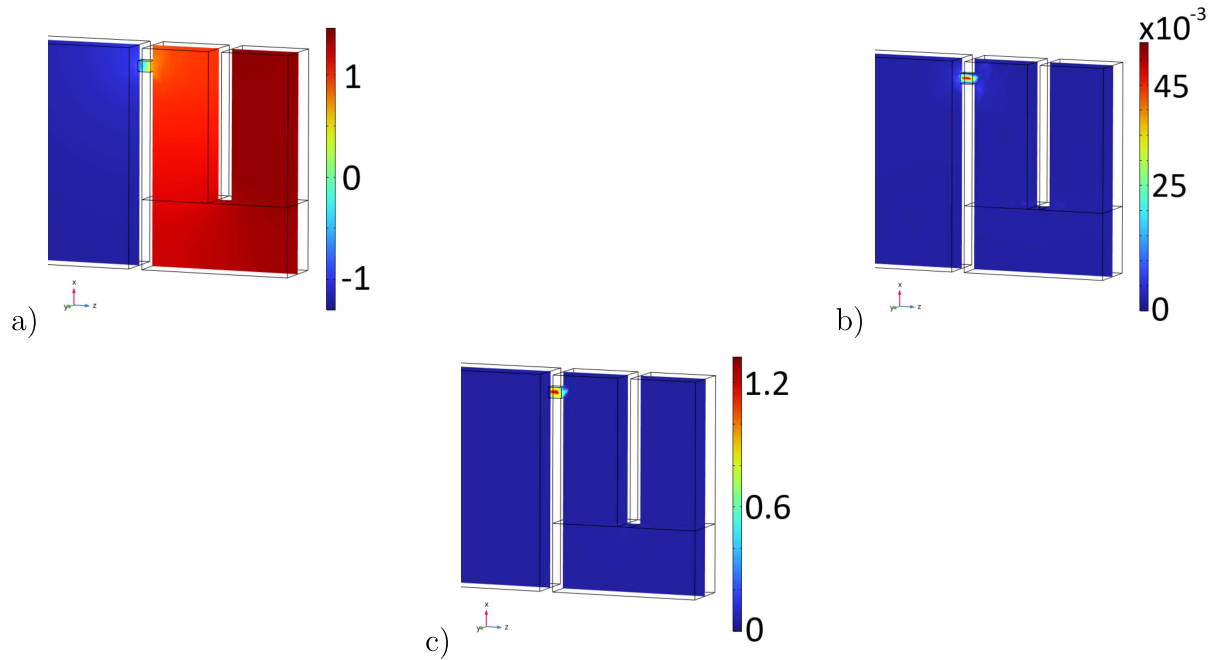
Fonte: O Autor.

ambas as figuras. Jin *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2018) observam que esse fenômeno é comum em metamateriais sem preenchimento, onde a pressão máxima se encontra na parede mais rígida e distante da perfuração, enquanto com o material poroso, esse padrão continua ocorrendo.

A parte b) das imagens destaca as regiões onde as maiores velocidades ocorrem dentro do metamaterial. Nesse caso, as maiores velocidades são observadas nas perfurações de entrada, com velocidades próximas a 0 nas paredes e máximas no centro. Ao comparar as velocidades entre as figuras, notamos que a Figura 44 apresenta valores mais altos, devido ao material com menor resistividade ao fluxo.

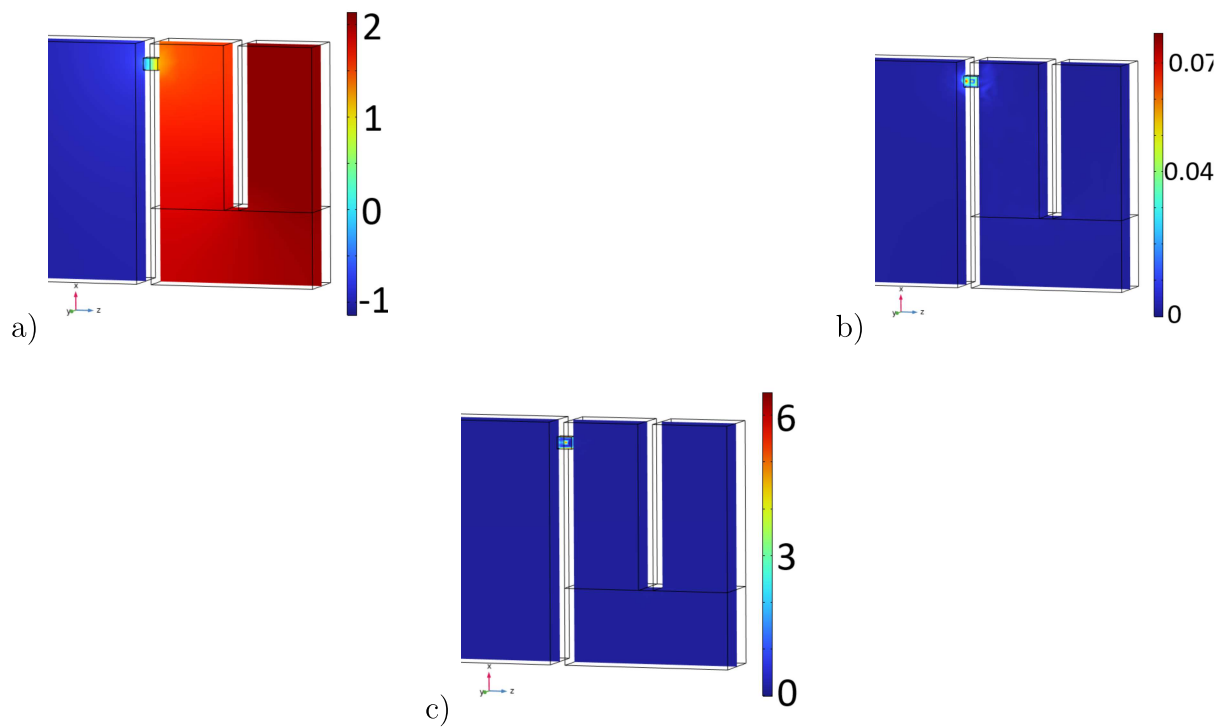
Por fim, na parte c) das figuras, estão representados os pontos de dissipação energética por termoviscosidade do metamaterial. Como esperado, esses pontos estão concentrados na perfuração de entrada das cavidades, conforme destacado por Tang *et al.* (2017), que ressaltam que a maior parte da energia acústica consumida se deve à dissipação viscosa em áreas estreitas, como nas perfurações.

Figura 43 – Desempenho da amostra A110231mp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



Fonte: O Autor.

Figura 44 – Desempenho da amostra A110231lp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



Fonte: O Autor.

#### 4.2.2.2 Amostra A210311 (Perfuração circular)

Continuando com as análises da posição 2 para materiais porosos apresenta-se os resultados para um metamaterial com a perfuração circular, tanto na Figura 45, com melamina inserida, e na Figura 46 utilizando lã de PET.

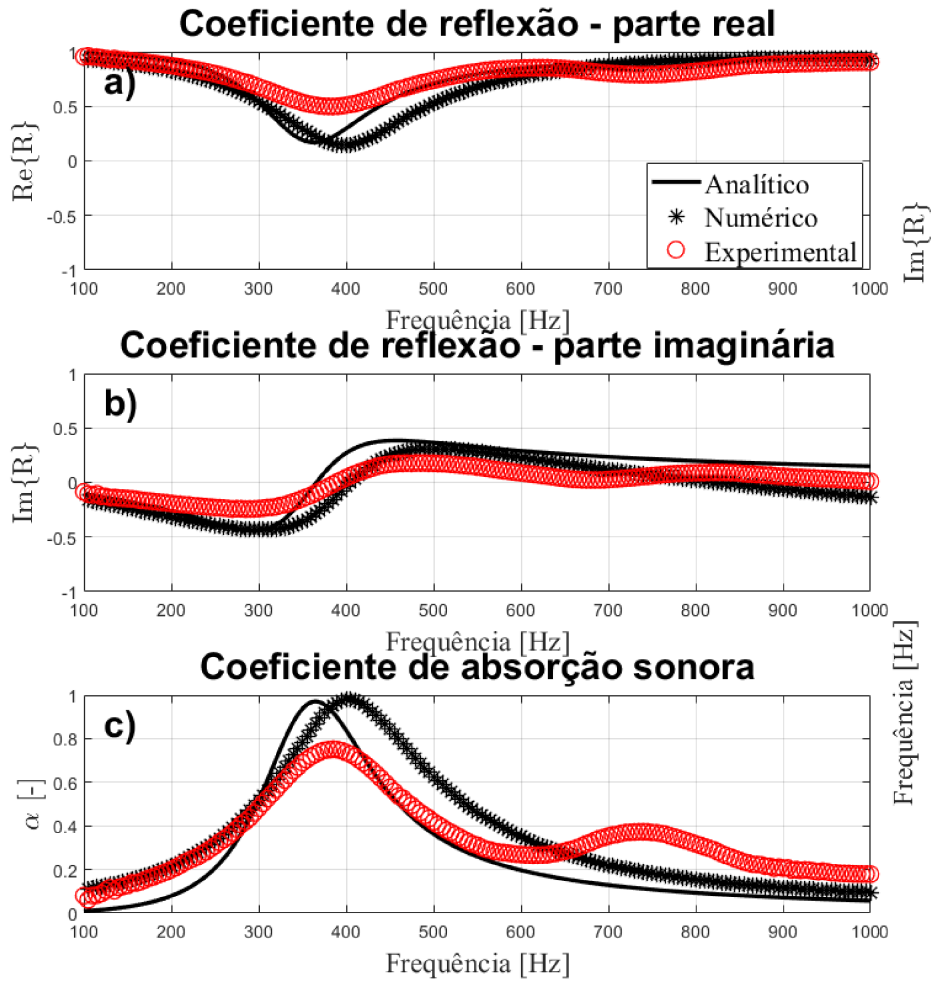
Assim como na amostra A110231mp2, a amostra A210311mp2 exibe algumas características desejadas no âmbito deste trabalho. Destacam-se uma banda de frequência de absorção sonora mais ampla, em que o modelo experimental apresenta 165 Hz para uma banda de absorção em 50%, enquanto os modelos analítico e numérico registram, respectivamente, 160 Hz e 215 Hz.

Os picos de absorção chegam a quase 100% para os valores teóricos e 75% para o resultado experimental. Mais uma vez, é importante considerar que as considerações feitas para os valores teóricos, como paredes perfeitamente rígidas, desprovidas de porosidade, e a ausência de efeitos de radiação entre as câmaras do metamaterial, tornam o valor de absorção além da capacidade real de uma amostra. No entanto, mesmo com essas diferenças, as frequências dos picos encontrados não estão tão distantes entre si, situando-se em 385 Hz para o resultado experimental e 400 Hz para os valores teóricos. Como observado nos gráficos de coeficiente de reflexão, há um considerável nível de reflexão fora da área de atuação, indicando a possibilidade de aprimoramento das características acústicas se um método viável for encontrado.

Na amostra A210311lp2, com lã de PET na posição 2, os valores teóricos de absorção aproximam-se do máximo entre 400 e 415 Hz, com um valor de  $\alpha$  de aproximadamente 1. Em contraste, o pico experimental ocorre em 395 Hz e possui  $\alpha$  de 0,8. A banda de frequência em 50% apresentada no resultado experimental é de 175 Hz, enquanto no modelo numérico ela aumenta para 210 Hz. Essas diferenças são novamente causadas pelas imperfeições dos modelos experimentais, que não estão presentes no modelo numérico e teórico, além de outros fatores já discutidos, como as imperfeições internas, as considerações dos modelos teóricos de paredes perfeitamente rígidas e não porosas, entre outros fatores que podem influenciar essas divergências entre os modelos.

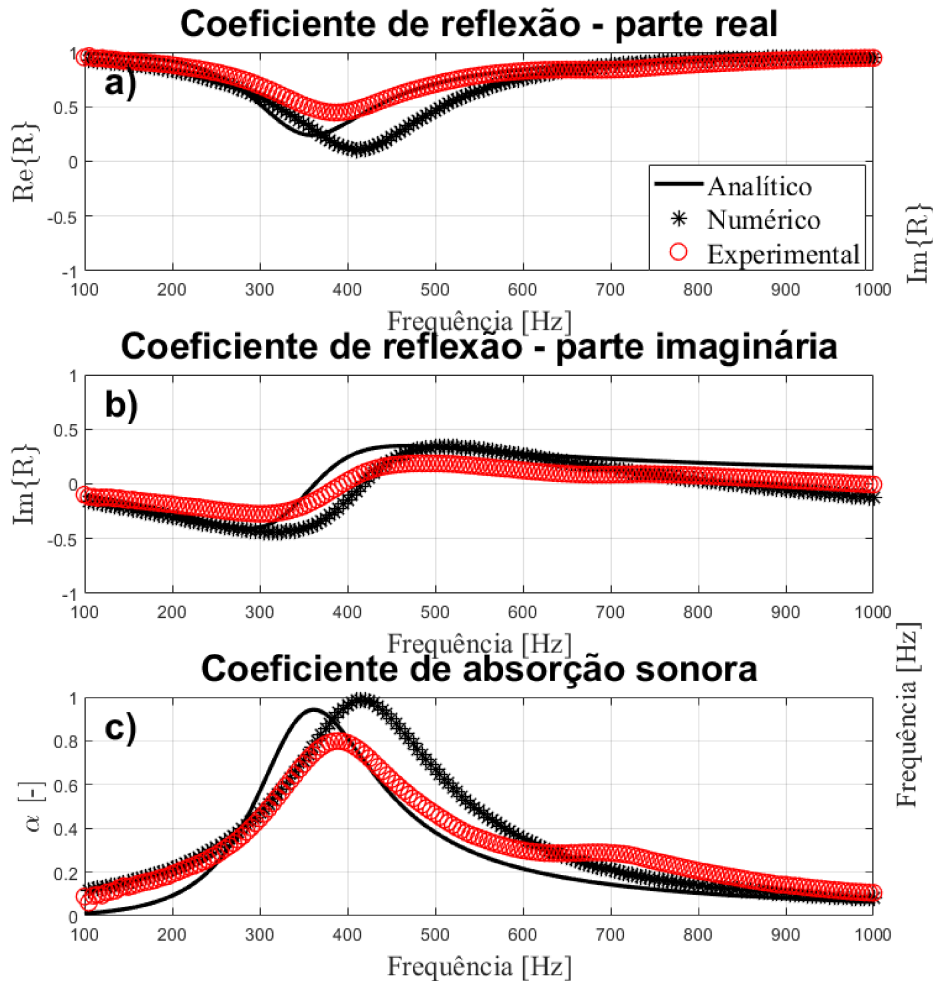


Figura 45 – Desempenho da amostra A210311mp2 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Figura 46 – Desempenho da amostra A210311p2 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

A síntese desta amostra pode ser observada na Tabela 14, que inclui os valores da frequência de pico,  $\alpha$  máximo e  $Q_\alpha$  das amostras analisadas. Na posição 2 e com perfuração circular, nota-se que a diferença entre os valores de  $Q_\alpha$  do metamaterial base e com material poroso apresenta pouca variação, exibindo um pequeno acréscimo. Isso se deve principalmente ao aumento da banda de frequência sem grande perda na absorção máxima. Vale ressaltar a redução na frequência do pico que ocorre ao adicionar o material poroso, o que pode ser relacionado à resistividade ao fluxo do material poroso incluso. Com uma menor resistividade ao fluxo, o valor da frequência pico mantém-se mais próximo do valor base, como pode ser observado nos resultados para A210311p2 e A210311.

Com os modelos numéricos de A210311mp2 e A210311p2, foram geradas as Figuras 47 e 48, que apresentam os campos internos de pressão, velocidade e dissipação a 450 Hz. Os comentários feitos para os modelos da perfuração quadrada também se aplicam à perfuração circular, ou seja, o comportamento interno não apresenta grandes diferenças

Tabela 14 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A210311 (metamaterial com perfuração circular).

Amostra	Freq. Pico (Hz)	$\alpha$ máximo	$Q_\alpha$	
Sem material poroso	Analítico	395	0,99	0,24
	Numérico	435	0,97	0,36
	Experimental	415	0,85	0,35
Melamina na pos. 2	Analítico	366	0,97	0,26
	Numérico	400	0,99	0,33
	Experimental	385	0,75	0,35
Lã de PET na pos. 2	Analítico	362	0,94	0,27
	Numérico	415	0,99	0,32
	Experimental	390	0,8	0,32

Fonte: O Autor.

quando se altera a perfuração de entrada. No entanto, o comportamento nessas perfurações apresenta diferenças, pois são duas geometrias distintas.

Mais uma vez, não há praticamente diferenças no comportamento físico entre os modelos quando se considera apenas a mudança do material poroso, apenas nos valores que representam esses comportamentos em determinadas frequências. Como visto anteriormente na análise de sensibilidades, o fator mais importante entre os materiais porosos para criar características distintas nesse metamaterial é a resistividade ao fluxo. Essa resistividade é menor na lã de PET, o que resulta em valores mais elevados de pressão, velocidade e dissipação térmica, pois a lã de PET permite maior fluxo de ar dentro da cavidade.

Figura 47 – Desempenho da amostra A210311mp2 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].

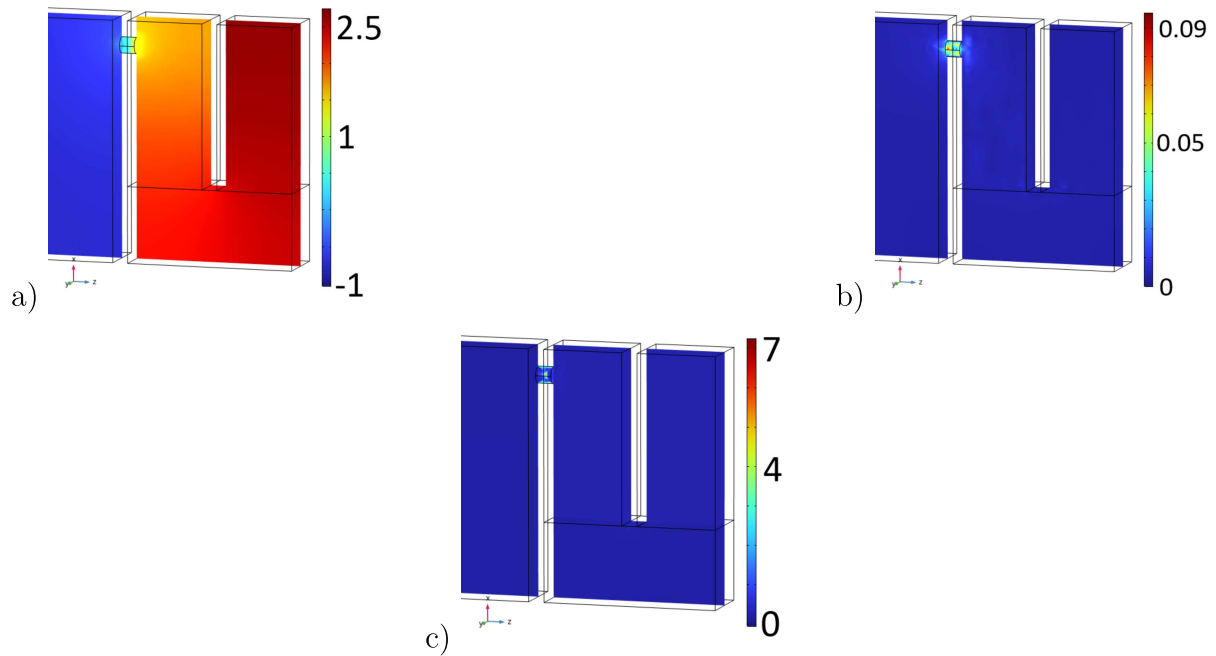
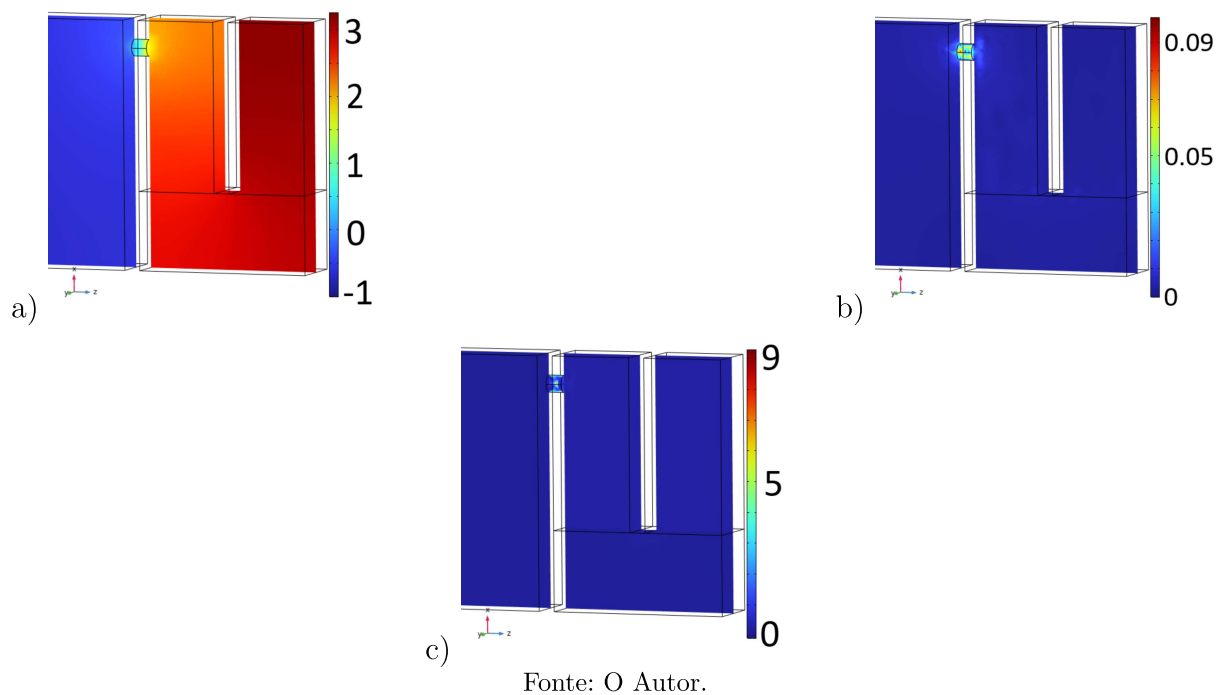


Figura 48 – Comparativo amostra A210311lp2 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



#### 4.2.2.3 Amostra A310594 (Perfuração fenda)

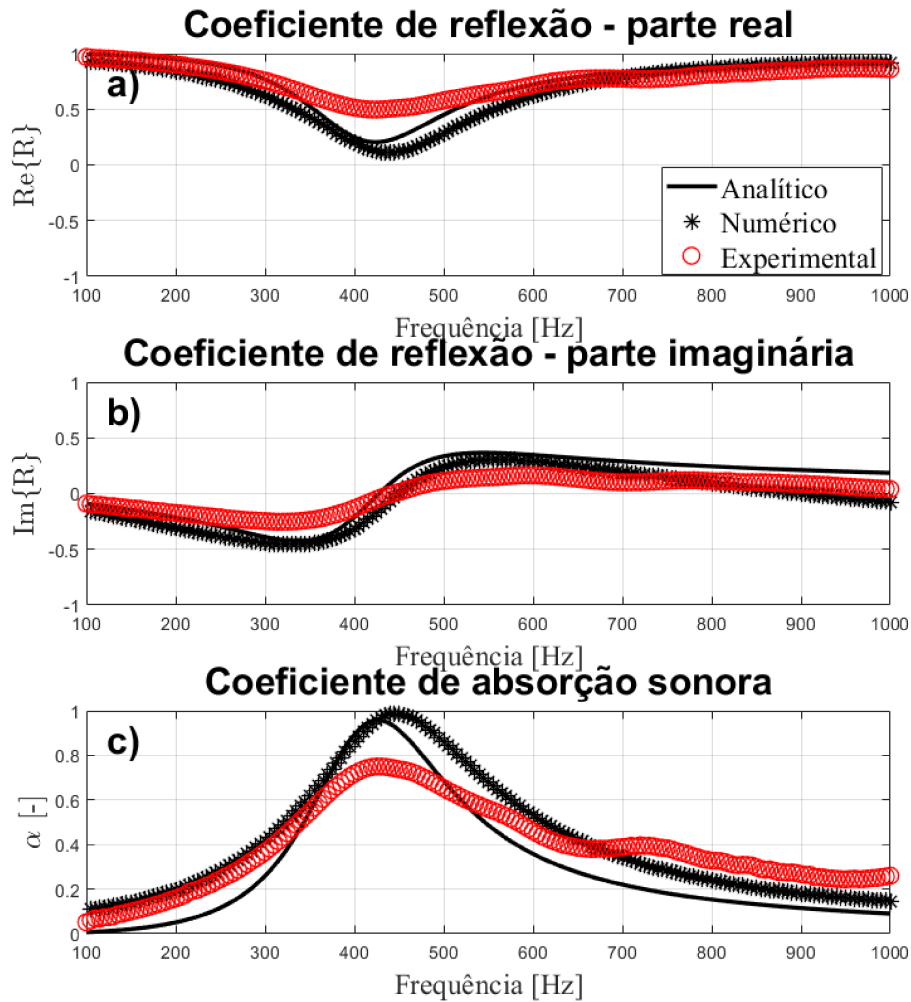
Concluindo a seção da posição 2 do material poroso, perfuração do tipo fenda, na Figura 49 estão os resultados para a análise da amostra A310594mp2, incluindo os resultados analítico, numérico e experimental. O resultado experimental apresenta um pico de absorção de 75% na frequência de 430 Hz, com largura de banda em 50% de 240 Hz. Em contraste, os resultados teóricos mostram um pico máximo de 99% em torno de 445 Hz, com largura de banda de 250 Hz em 50% de absorção.

A diferença no valor máximo de absorção pode ser explicada pelas características construtivas das amostras experimentais, considerando que não são perfeitamente consideradas as impedâncias adicionais existentes no material, alterando assim o comportamento das curvas. Mesmo aplicando uma certa quantidade de impedâncias adicionais, descrita como uma impedância adicional no interior da cavidade por Cassetari (2023), as curvas não coincidem totalmente, principalmente nos pontos fora de sintonia da amostra, apresentando assim características não incluídas nos modelos teóricos ou apenas como parte das imperfeições existentes dentro da amostra devido ao processo de montagem, que também não é considerado nos modelos teóricos.

A Figura 50 apresenta os resultados para a amostra A310594lp2. As curvas numéricas e experimentais mostram boa concordância, apesar de envolver a região problemática de 600 e 700 Hz para as amostras experimentais. Pode-se considerar que, devido aos problemas de montagem na determinação experimental, há alguma alteração na curva, e ela pode não ser tão exata quanto a apresentada na parte c).

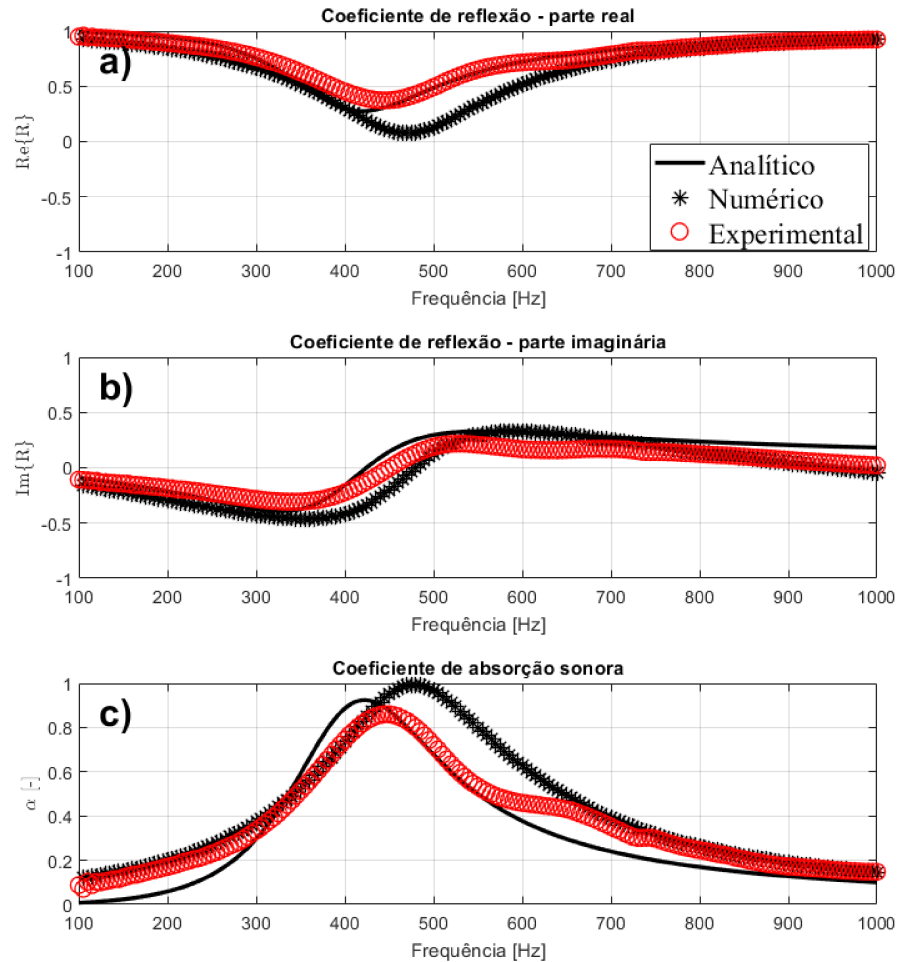
No entanto, o pico de absorção numérico atinge o máximo em 475 Hz, enquanto a curva experimental tem o pico em 445 Hz, sendo próximo o suficiente para que as diferenças possam ser explicadas pelas deficiências dos modelos, que não conseguem descrever totalmente as características reais das amostras. Com a aplicação da lã de PET na posição 2, houve um aumento da banda de absorção acima de 50%, tanto para os valores numéricos quanto para os experimentais quando comparado ao uso de melamina, sendo agora 260 Hz para o resultado numérico e 215 Hz para a curva experimental. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de o pico experimental ter crescido para 86% na amostra experimental e se mantido em 99% para a curva numérica.

Figura 49 – Desempenho da amostra A310594mp2 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Figura 50 – Desempenho da amostra A310594lp2 (metamaterial com perfuração fenda e com lâ de PET na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Um resumo das características das curvas apresentadas é apresentado na Tabela 15 para comparações rápidas entre indicadores acústicos de desempenho.  $Q_\alpha$  novamente permanece próximo dos valores base, com pouco ganho, pois quando há um aumento na largura de banda, há também uma redução no valor máximo de  $\alpha$ . Isso faz com que a média ao longo da faixa de frequência analisada (100 a 1.000 Hz) permaneça muito próxima do valor inicial, apesar das diferenças nas características das curvas.

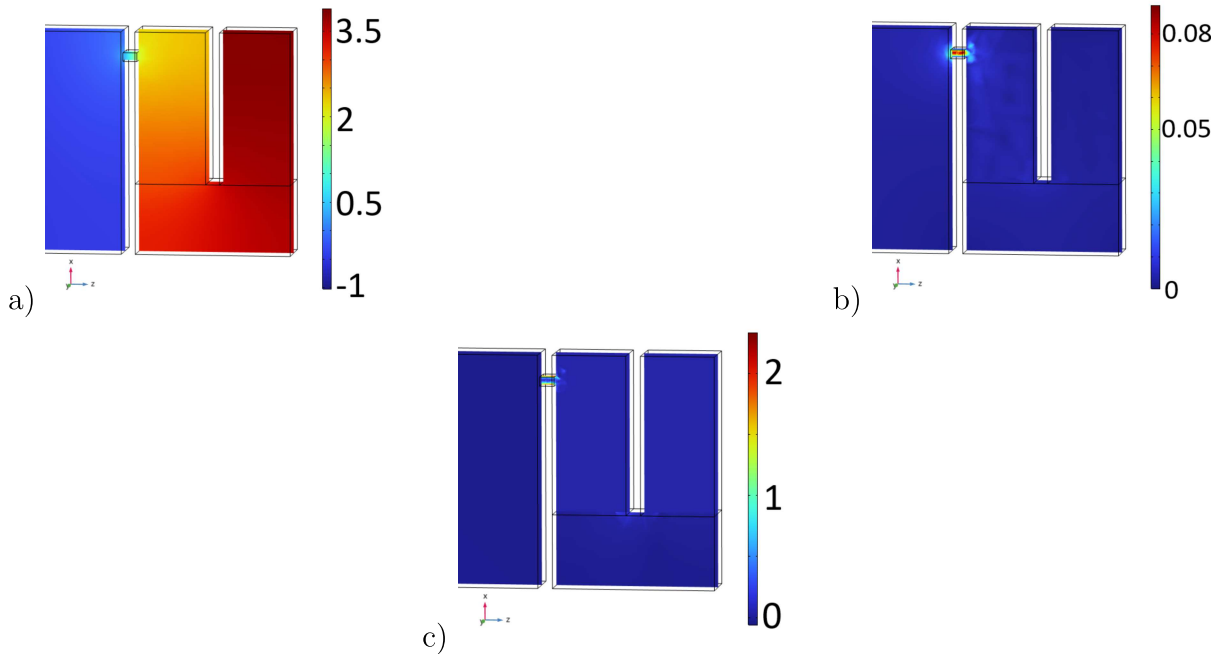
As Figuras 51 e 52 representam os campos gerados a partir dos modelos numéricos realizados para o estudo, abrangendo a pressão, velocidade e dissipação térmica na parte interna do metamaterial. As condições continuam próximas às apresentadas nas outras seções anteriormente, e mais uma vez o que se altera ao utilizar uma forma geométrica de perfuração diferente são os campos dentro da perfuração, enquanto o resto do metamaterial apresenta as mesmas características já definidas.

Tabela 15 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A310594 (metamaterial com perfuração fenda).

	Amostra	Freq. Pico (Hz)	$\alpha$ máximo	$Q_\alpha$
Sem material poroso	Analítico	430	0,99	0,26
	Numérico	445	0,98	0,42
	Experimental	445	0,89	0,38
Melamina na pos. 2	Analítico	394	0,97	0,30
	Numérico	445	0,96	0,31
	Experimental	424	0,75	0,39
Lã de PET na pos. 2	Analítico	422	0,92	0,32
	Numérico	475	0,99	0,39
	Experimental	445	0,86	0,37

Fonte: O Autor.

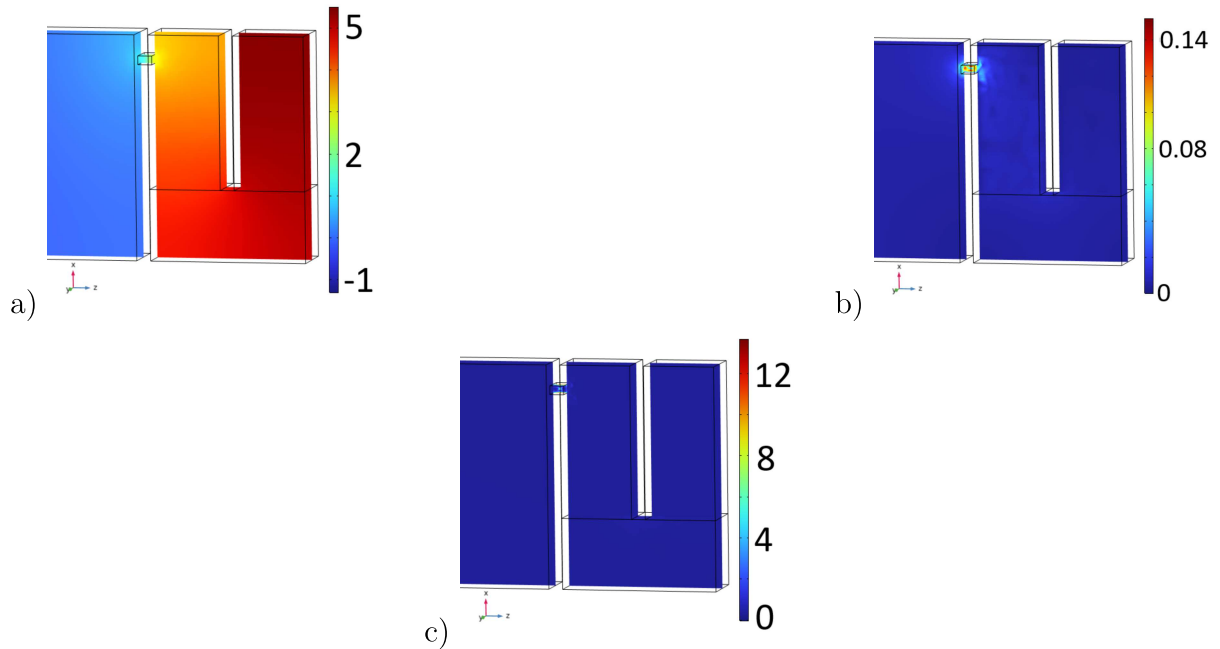
Sendo os modelos aplicados para 450 Hz, as respostas se aproximam das apresentadas nas seções sobre a perfuração quadrada e circular, inclusive seguindo o mesmo comportamento em que o metamaterial com a adição do material poroso de menor resistividade ao fluxo (lã de PET) apresenta valores máximos maiores de pressão, velocidade e dissipação quando comparado aos dados do metamaterial com melamina.

Figura 51 – Desempenho da amostra A310594mp2 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].

Fonte: O Autor.



Figura 52 – Desempenho da amostra A310594lp2 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de pet na posição 2) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



Fonte: O Autor.

#### 4.2.2.4 Síntese preliminar sobre o material poroso na posição 2 (intermediária)

A posição 2 apresenta resultados promissores quando o interesse é o aumento da banda de frequência, demonstrando consistentemente um alargamento da banda, independentemente do material poroso utilizado. Observa-se também que a influência da perfuração utilizada é principalmente na frequência do pico de absorção, enquanto a impedância adicionada pelo material poroso faz esse pico diminuir de valor máximo, mas não necessariamente tem impacto significativo sobre a frequência central, apresentando uma diferença entre 5 a 15 Hz em relação ao metamaterial base.

Com a presença de valores acima de 50% de absorção, foi utilizado além do  $Q_\alpha$  a banda de frequência de 50%, pois, como os resultados indicam, o  $Q_\alpha$ , quando aplicado para uma faixa de frequência como a utilizada aqui, nem sempre apresenta resultados claros quando apresentado sozinho necessitando do acompanhamento de mais informações.

Novamente, as discrepâncias entre os modelos teóricos e experimentais apresentaram as mesmas características, indicando que os problemas que existiam para caracterizar o material na análise da posição 1 ainda persistem na posição 2 e são variáveis difíceis de incluir com total coerência, fazendo assim com que sempre existam diferenças entre os resultados experimentais e teóricos.

### 4.2.3 Análise dos resultados na Posição 3 (posterior)

Na última posição em que foi aplicado material poroso, posição 3 (posterior). Nesta posição, a cavidade preenchida com o ar vem totalmente antes do material poroso. Serão utilizadas novamente as três amostras apresentadas anteriormente, porém agora a cavidade é chamada de cavidade  $I$ , sendo idêntica à cavidade  $A$ , com a única diferença sendo que ela também abre a parte posterior para poder adicionar o material poroso. Continuando com as mesmas amostras apresentadas nas seções anteriores tendo uma amostra representando cada tipo de perfuração, uma circular, uma quadrada e uma de tipo fenda.

Novamente as figuras com o material base são as mesmas já apresentadas na seção que descreve a posição 1 (Figuras 25, 31 e 36).

#### 4.2.3.1 Amostra A110231 (Perfuração quadrada)

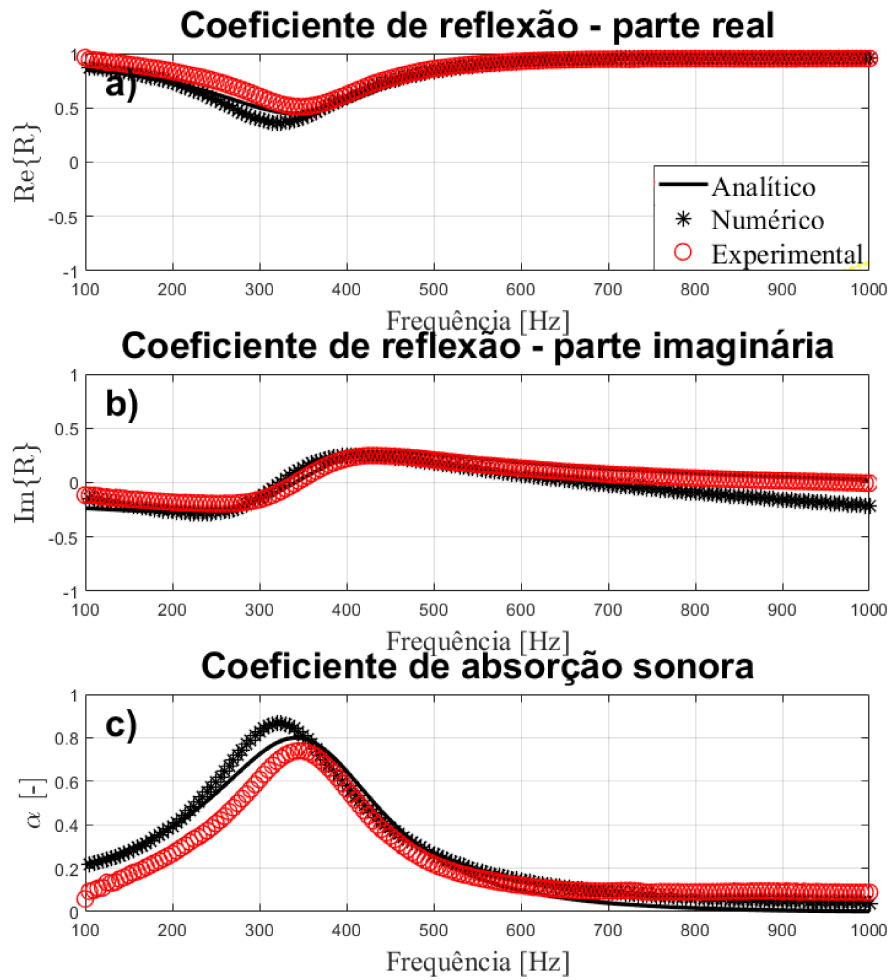
Iniciando com a amostra I110231mp3, de perfuração do tipo quadrada, a Figura 53 apresenta os resultados analíticos, numéricos e experimentais da amostra. Quando o material aplicado na posição 3 é a melamina, ocorre uma diminuição na frequência central do pico de absorção em todos os resultados, variando entre 15 a 35 Hz. Junto com essa variação, não há um aumento na banda de frequência em 50% quando comparado ao metamaterial base, porém há a diminuição do valor máximo de absorção para em torno de 91% nos resultados teóricos. No entanto, o valor experimental cresce para 74%. Essas diferenças no resultado experimental se devem às melhores condições dos testes realizados para a posição 3 quando comparada ao teste base original, onde ainda havia uma montagem inadequada, o que ocasionaria uma absorção máxima menor devido à interferência na curva do resultado.

A curva experimental apresentada nessa seção é muito mais limpa de ruídos quando comparada às curvas iniciais. Mesmo assim, ainda existem diferenças entre os valores teóricos e experimentais, como nas seções anteriores, pelos mesmos motivos de os resultados obtidos analiticamente e numericamente não preverem todas as fontes possíveis de impedância, como o material ter uma porosidade intrínseca e as possibilidades de que as várias células existentes na amostra experimental gerem efeitos de radiação nas outras células próximas.

Com a amostra onde a lã de PET foi aplicada na posição 3, representada na Figura 54, nota-se um aumento na frequência central dos picos de absorção, passando para cerca de 370 Hz nos valores teóricos e 355 Hz na curva experimental, padrão já discutido anteriormente devido ao fato de a lã de PET possuir menor resistividade ao fluxo quando comparada à melamina. Apresenta também um aumento na banda de frequência em 50%, chegando a 215 Hz com os resultados teóricos e 160 Hz na amostra experimental. Esse aumento é acompanhado por um crescimento na absorção máxima no modelo experimental e uma redução nos valores teóricos. Novamente, esse comportamento pode ser discutido

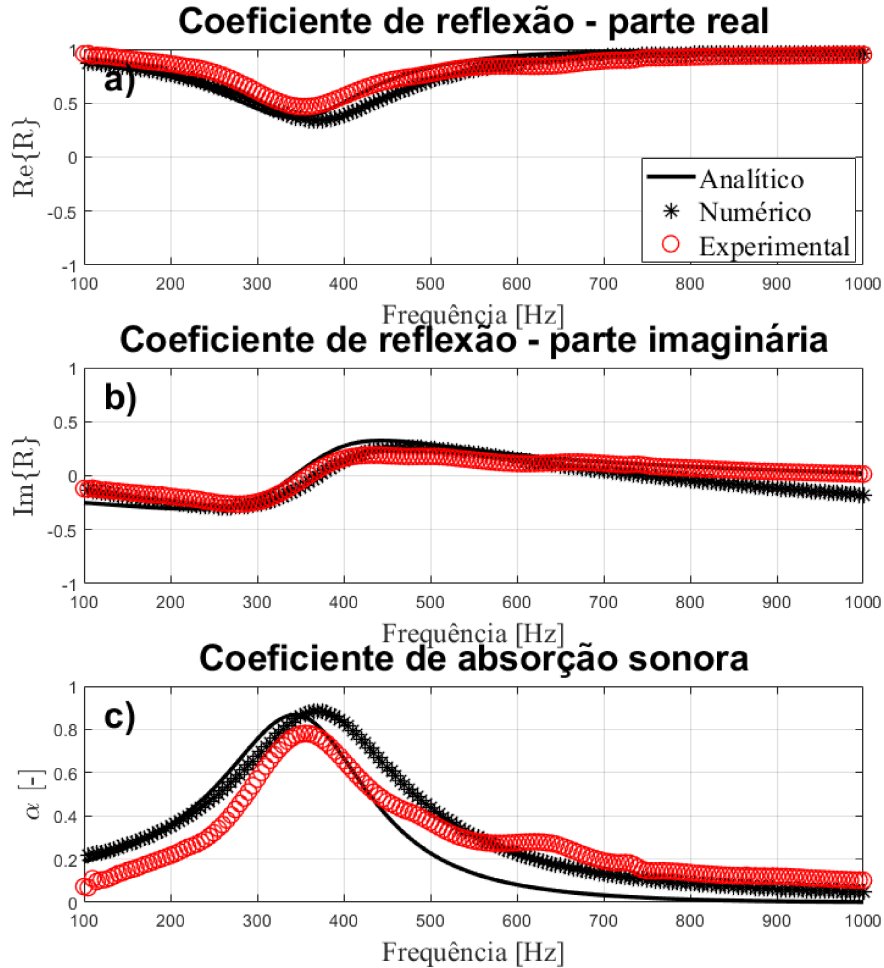
como uma melhora na realização dos testes, onde buscou-se uma melhora significativa do processo de montagem para evitar picos oriundos de problemas na montagem no tubo de impedância.

Figura 53 – Desempenho da amostra I110231mp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 3) . a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Figura 54 – Desempenho da amostra I110231p3 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

A Tabela 16 apresenta um resumo dos indicadores de desempenho para a comparação das curvas com o metamaterial base A110231. Observa-se os valores de  $Q_\alpha$ , nos quais ocorrem aumentos nos valores teóricos quando comparados ao metamaterial base. Para os  $Q_\alpha$  dos dados experimentais, a redução é causada pela melhora na curva experimental, onde os excessos de absorção não causados pelo absorvedor, mas sim pela montagem problemática da amostra, reduzem a média geral calculada pelo fator  $Q_\alpha$ .

Com as Figuras 55 e 56 obtidas do modelo numérico feito no software COMSOL Multiphysics, pode-se mais uma vez perceber o padrão já demonstrado nas seções anteriores, onde há um aumento de pressão na cavidade com o valor máximo sendo no ponto mais distante da perfuração de entrada, mesmo quando aplicada a melamina como material poroso e também na aplicação da lã de PET. Novamente, os efeitos mais aparentes são na perfuração de entrada, neste caso, a perfuração quadrada, seguindo os mesmos padrões já previamente discutidos, em que a cavidade preenchida com melamina apresenta valores

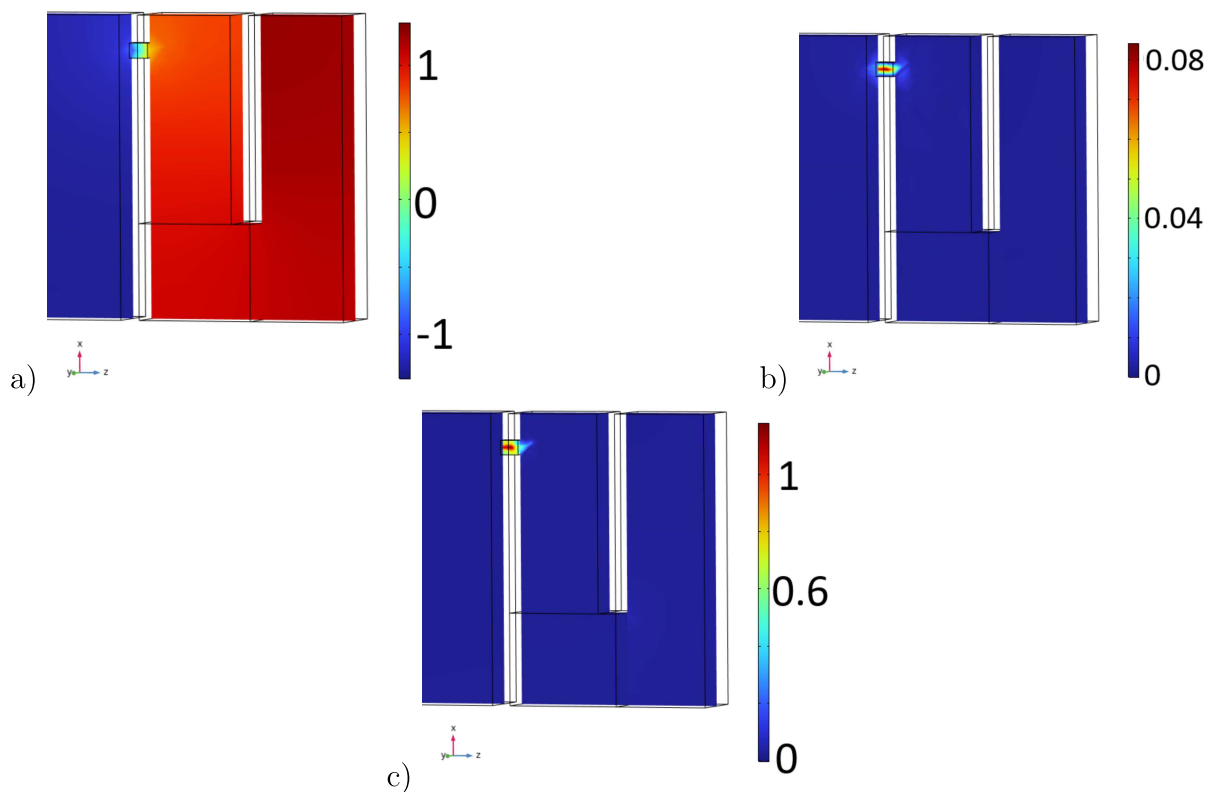
Tabela 16 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A110231 (metamaterial com perfuração quadrada).

	Amostra	Freq. Pico (Hz)	$\alpha$ máximo	$Q_\alpha$
Sem material poroso	Analítico	375	0,95	0,17
	Numérico	360	0,77	0,18
	Experimental	360	0,71	0,34
Melmina na pos. 3	Analítico	342	0,80	0,25
	Numérico	320	0,91	0,27
	Experimental	345	0,74	0,24
Lã de PET na pos. 3	Analítico	342	0,87	0,25
	Numérico	370	0,93	0,31
	Experimental	355	0,78	0,29

Fonte: O Autor.

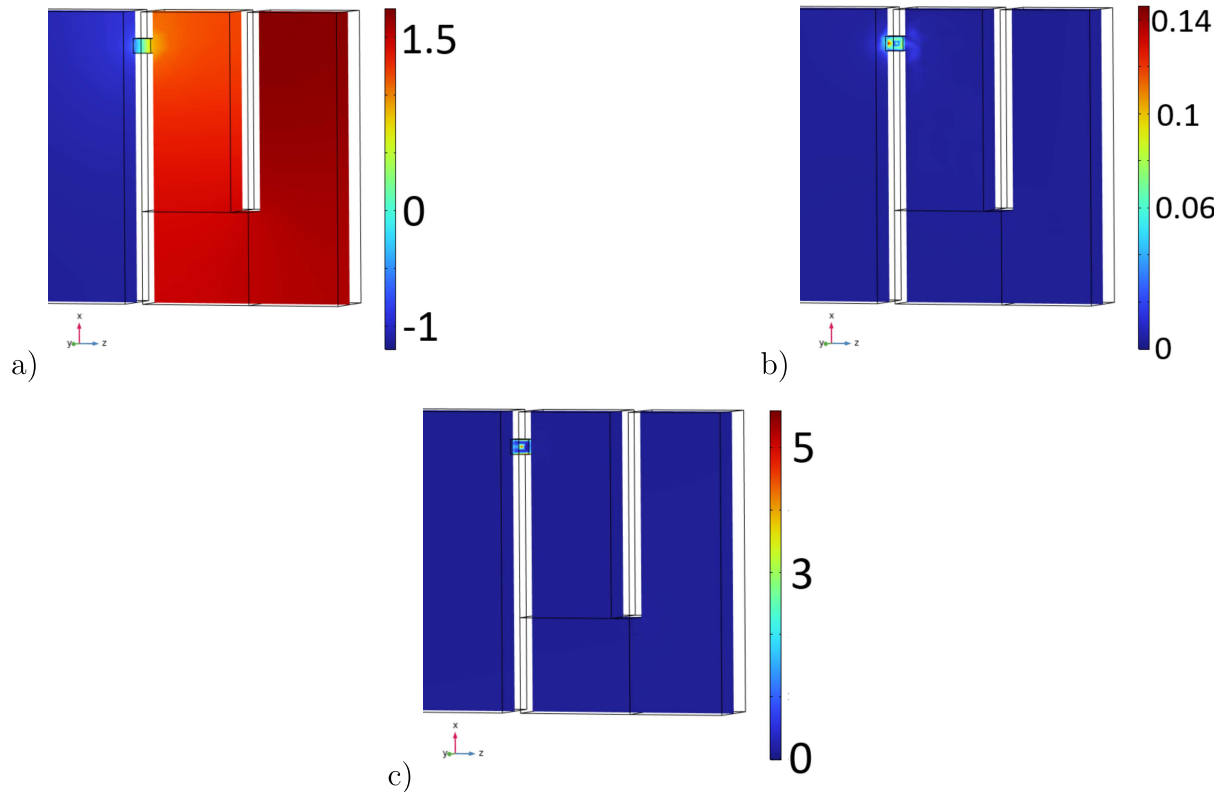
menores em comparação à cavidade com lã de PET devido à diferença da resistividade ao fluxo presente entre os dois materiais.

Figura 55 – Desempenho da amostra I110231mp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



Fonte: O Autor.

Figura 56 – Desempenho da amostra I110231lp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de pet na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



Fonte: O Autor.

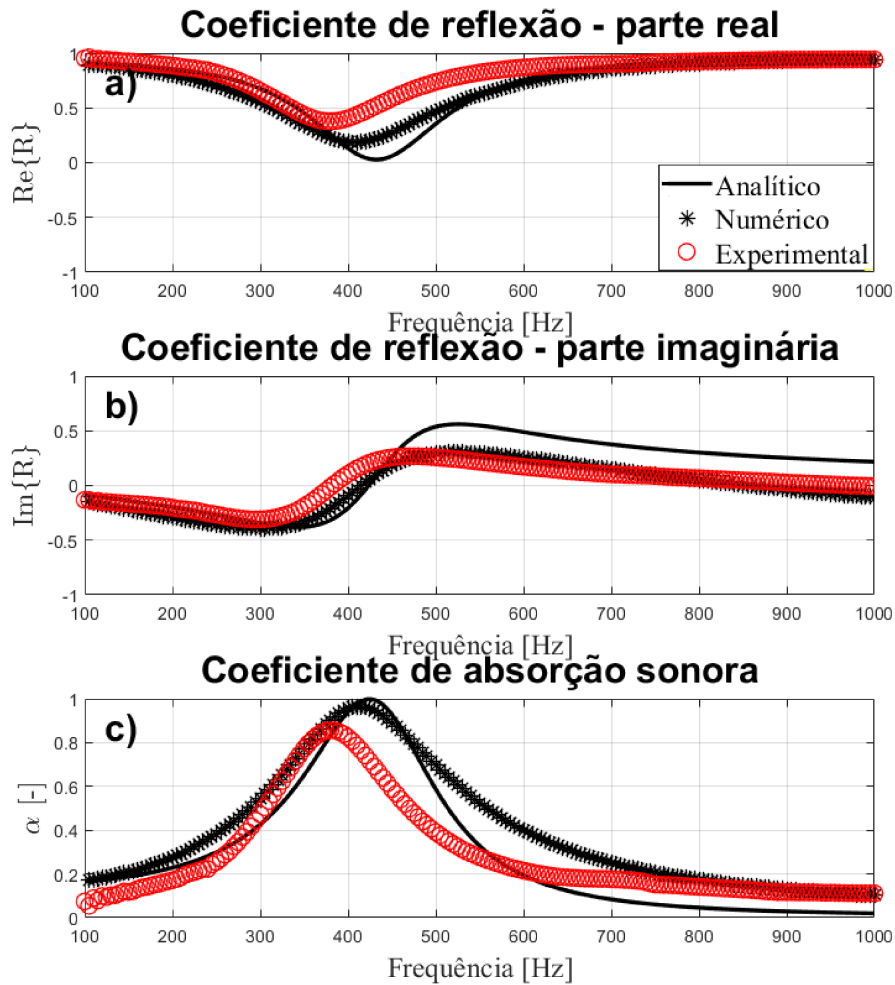
#### 4.2.3.2 Amostra A210311 (Perfuração circular)

A Figura 57 contém as curvas dos resultados para a amostra I210311mp3, de perfuração circular. A frequência central do pico de absorção nesta amostra também é reduzida, seguindo os mesmos padrões das mudanças na perfuração de entrada quadrada. Há um aumento nos valores de  $\alpha$  nos picos, onde os resultados teóricos estão muito próximos a 100% de absorção, e o pico experimental encontra-se em torno de 86%, sendo estes valores maiores que os encontrados no metamaterial base. A banda de frequência em 50% é de 165 Hz para a curva experimental e 245 Hz para a numérica. A parte real do coeficiente de reflexão tende a 0 quando o valor da curva de absorção é máximo, como é o esperado, enquanto fora da região de sintonia do absorvedor, os valores tendem a 1, o que implicaria em alta reflexão da onda naquelas frequências.

Para a amostra com lã de PET, os resultados estão indicados na Figura 58. A banda de absorção em 50% do metamaterial com lã de PET na posição 3 tem pouca diferença ao compará-la com a melamina na posição 3, apresentando apenas 5 Hz a menos no resultado experimental, sendo 160 Hz, e 260 Hz nos resultados teóricos. Os resultados experimentais apresentam um pico de absorção ainda maior que o produzido com melamina, com  $\alpha$  máximo de 0,89, e os  $\alpha$ s teóricos tendendo a 1 (acima de 0,99). Mais uma vez, a lã de PET

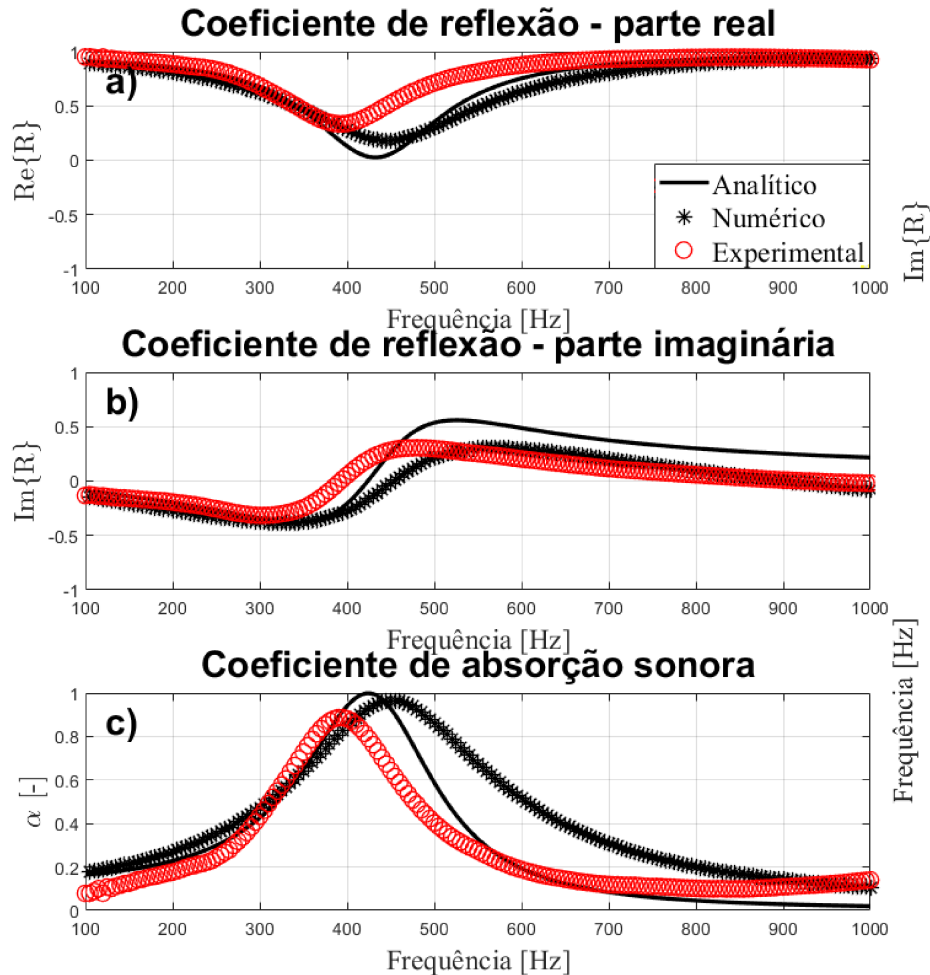
produz frequências centrais para os picos entre a frequência base e a melamina, resultando novamente na conclusão de que com maior resistividade ao fluxo, o valor dessa frequência central reduz.

Figura 57 – Desempenho da amostra I210311mp3 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Figura 58 – Desempenho da amostra I210311p3 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

A Tabela 17 sintetiza os indicadores apresentados nas curvas das figuras anteriores para uma comparação direta entre os indicadores de desempenho do absorvedor estudado.  $Q_\alpha$  continua sendo o ponto de maior atenção, pois representa uma média da absorção ao longo da faixa de frequência analisada. O mesmo efeito que apareceu na comparação da perfuração de entrada quadrada reaparece na perfuração circular: a melhora na realização do teste experimental remove pontos de absorção na curva que não deveriam estar presentes, fazendo com que o  $Q_\alpha$  diminua, apesar dos outros indicadores apresentarem melhora nos resultados quando aplicado um absorvedor poroso na cavidade do metamaterial.

A partir do modelo numérico foi retirado os campos de pressão, velocidade acústica e dissipação térmica, e estão apresentados nas Figuras 59 e 60 para a amostra I210311mp3 e I210311lp3, respectivamente. Comparando os campos apresentados entre as duas amostras continua com a mesma tendencia do valor máximo da pressão na parede rígida mais distante da perfuração de entrada para ambos os materiais. E os valores de velocidade e



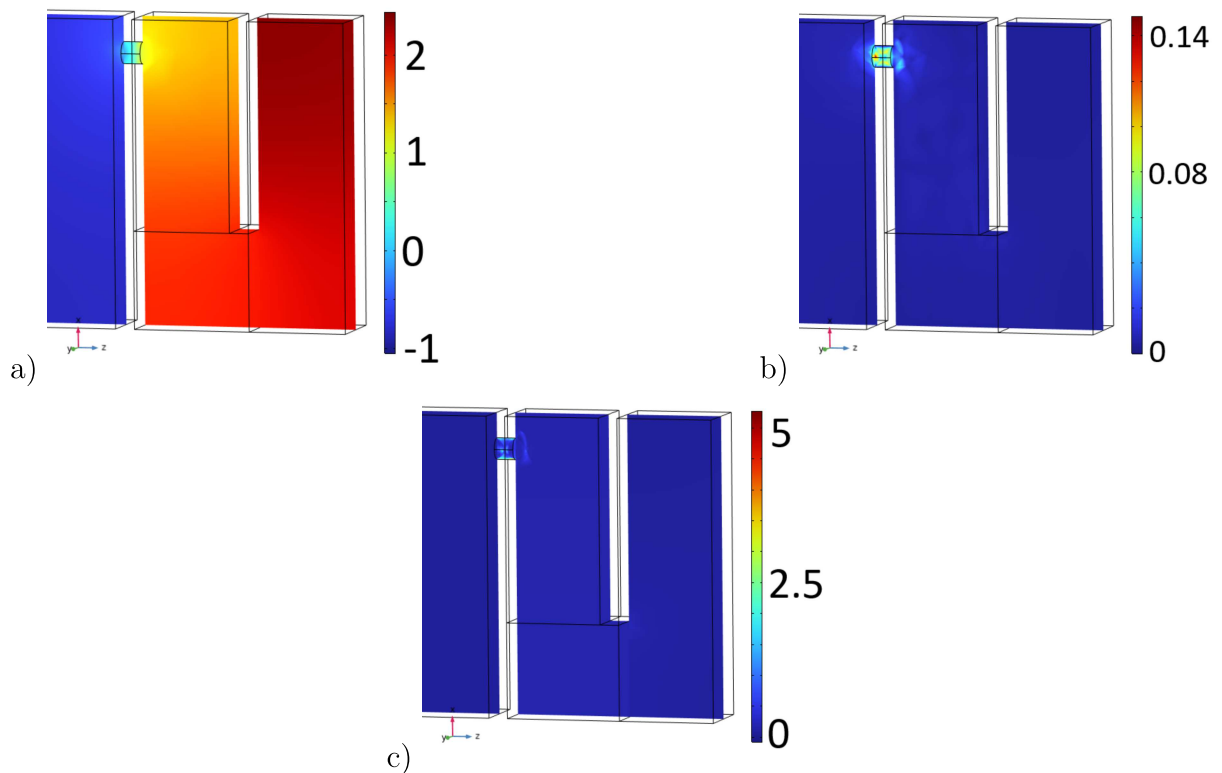
Tabela 17 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A210311 (metamaterial com perfuração circular).

	Amostra	Freq. Pico (Hz)	$\alpha$ máximo	$Q_\alpha$
Sem material poroso	Analítico	395	0,99	0,24
	Numérico	435	0,97	0,36
	Experimental	415	0,85	0,35
Melamina na pos.3	Analítico	424	0,99	0,29
	Numérico	410	0,99	0,36
	Experimental	380	0,86	0,29
Lã de PET na pos. 3	Analítico	424	0,99	0,29
	Numérico	450	0,99	0,39
	Experimental	395	0,89	0,28

Fonte: O Autor.

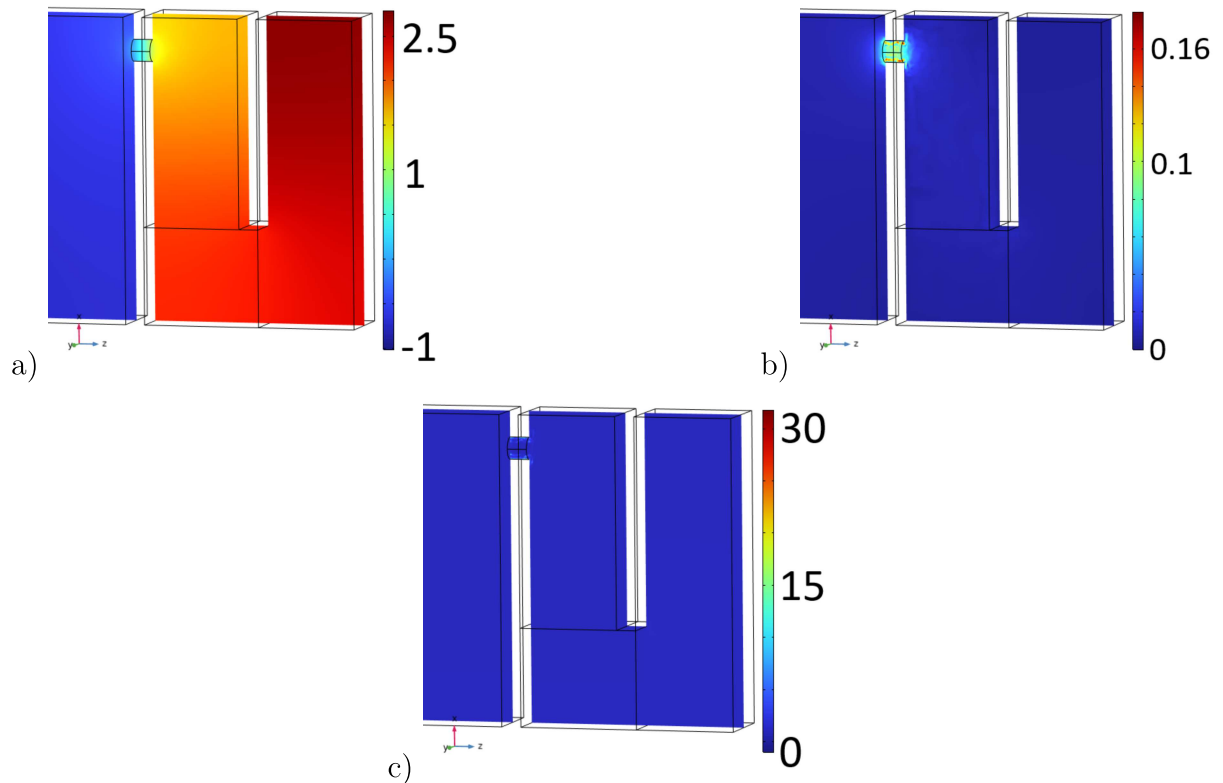
dissipação térmica na perfuração de entrada são maiores quando o material com menor resistividade ao fluxo esta presente no metamaterial.

Figura 59 – Desempenho da amostra I210311mp3 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [Pa]. b) Velocidade acústica instantânea [m/s]. c) Dissipação térmica [W/m<sup>2</sup>].



Fonte: O Autor.

Figura 60 – Desempenho da amostra I210311lp3 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



Fonte: O Autor.

#### 4.2.3.3 Amostra A310594 (Perfuração fenda)

Por fim nesta seção esta a perfuração de tipo fenda, com a amostra I310594mp3, com as curvas resultantes dos modelos teóricos e experimental apresentadas na Figura 61. A amostra com perfuração do tipo fenda apresenta uma banda de frequência de 50% de 215 Hz para a curva experimental e 310 Hz na curva numérica. O picos de absorção está centrado em 430 Hz para o resultado experimental apresentando um  $\alpha$  de 0,87, e o 460 Hz no resultado numérico com  $\alpha$  de 0,98. A diferença existente entre os valores teóricos e numéricos é pequena neste caso mas ainda e ainda pode ser explicado da mesma forma que nos outros resultados vistos anteriormente, diferenças entre os modelos teóricos e experimentais que não são previstas, como o material utilizado na amostra é considerado perfeitamente rígido e liso, enquanto no experimento o material apresenta poros naturalmente, imperfeições nas paredes internas das cavidades que podem gerar impedâncias que não são levadas em consideração totalmente mesmo quando aplicado a impedância extra necessária para compensar essas diferenças.

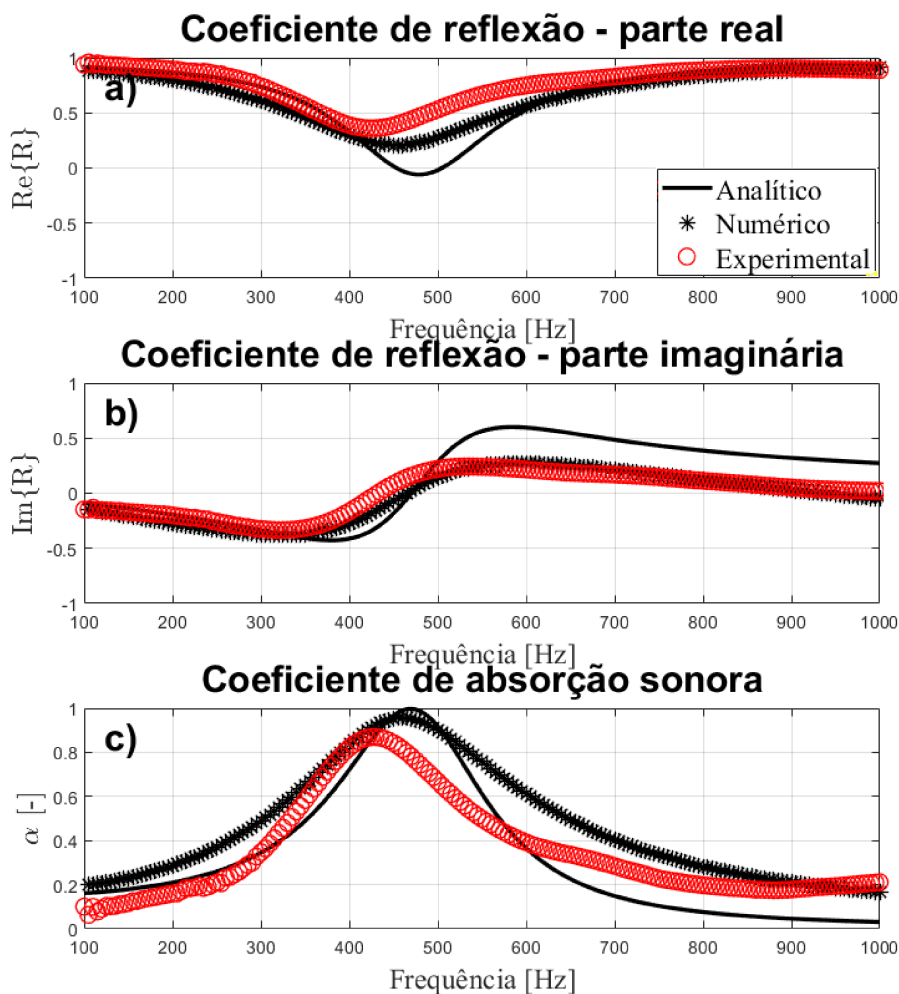
Continuando a análise da Figura 62, que exhibe os resultados da amostra I310594lp3m, e comparando-os aos dados do metamaterial base e com melamina aplicada. As curvas numérica e experimental apresentam valores de banda de 50% iguais a 310 Hz e 210 Hz, respectivamente. Quando comparados aos dados das curvas da melamina,

observa-se apenas uma diferença de 5 Hz entre os valores experimentais. Isso sugere que, com a aplicação da melamina no metamaterial com perfuração de fenda, pode-se esperar bandas de frequência equivalentes, independentemente do tipo de material aplicado.

Ao comparar os valores de frequência da absorção máxima, nota-se um aumento na frequência a partir do metamaterial base, e o material com menor resistividade ao fluxo apresenta resultados melhores. Isso ocorre possivelmente devido à utilização de uma frequência de pico mais apropriada para o metamaterial em estudo o atingindo uma maior sintonia da frequência de ressonância, resultando em um aumento na absorção para 91%.

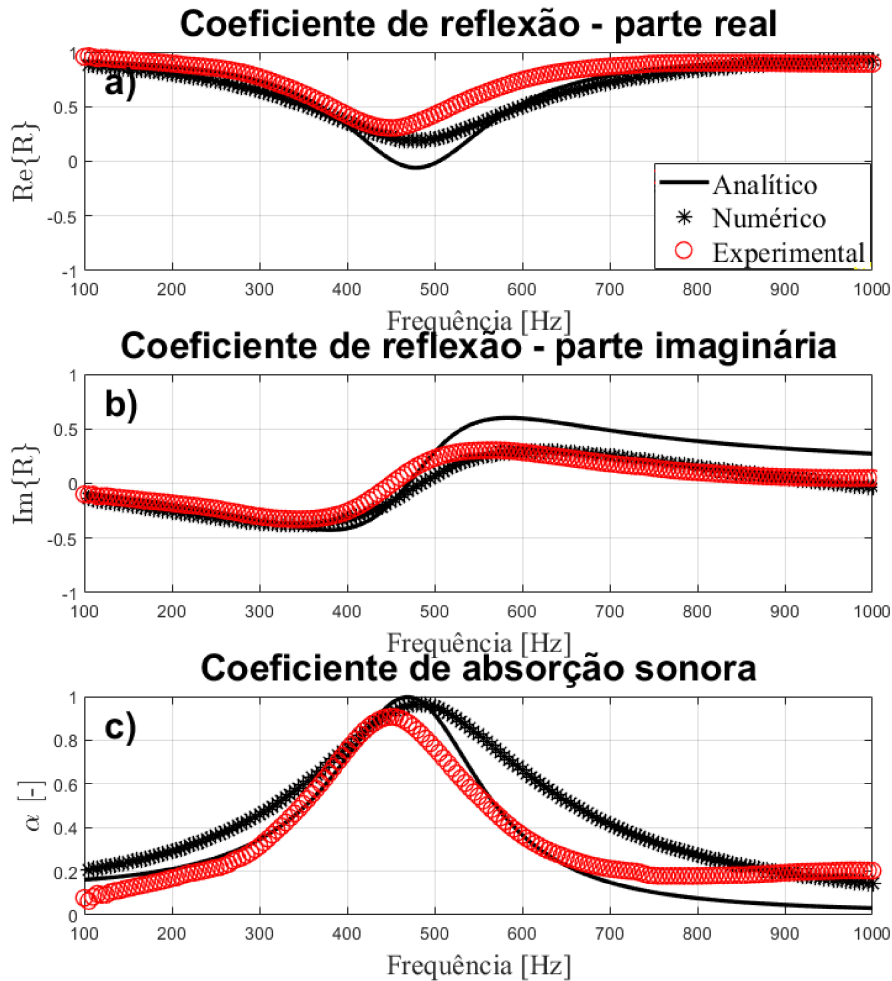
Ainda persistem diferenças entre os modelos teóricos e experimentais, conforme discutido ao longo deste trabalho. Essas discrepâncias continuam a ser responsáveis por essa diferença, mesmo que seja pequena.

Figura 61 – Desempenho da amostra I310594mp3 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Figura 62 – Desempenho da amostra I310594lp3 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

A Tabela 18 sintetiza, em um único lugar, os indicadores acústicos para comparação entre os três absorvedores analisados. Ao comparar os resultados de  $Q_\alpha$  entre as amostras, observa-se uma melhoria nos resultados quando se utilizam materiais porosos no interior da cavidade do metamaterial. Isso resulta tanto na ampliação da banda de absorção da seção em análise quanto no aumento do valor máximo de  $\alpha$  presente no pico. Este efeito é gerado pela impedância do absorvedor poroso utilizado, elevando a impedância geral do metamaterial para um ponto onde sua ação é mais eficaz. Apesar do aumento na frequência central não ser um dos objetivos do trabalho, vale ressaltar que projetar frequências de atuação maiores é mais fácil quando comparado com frequências mais baixas.

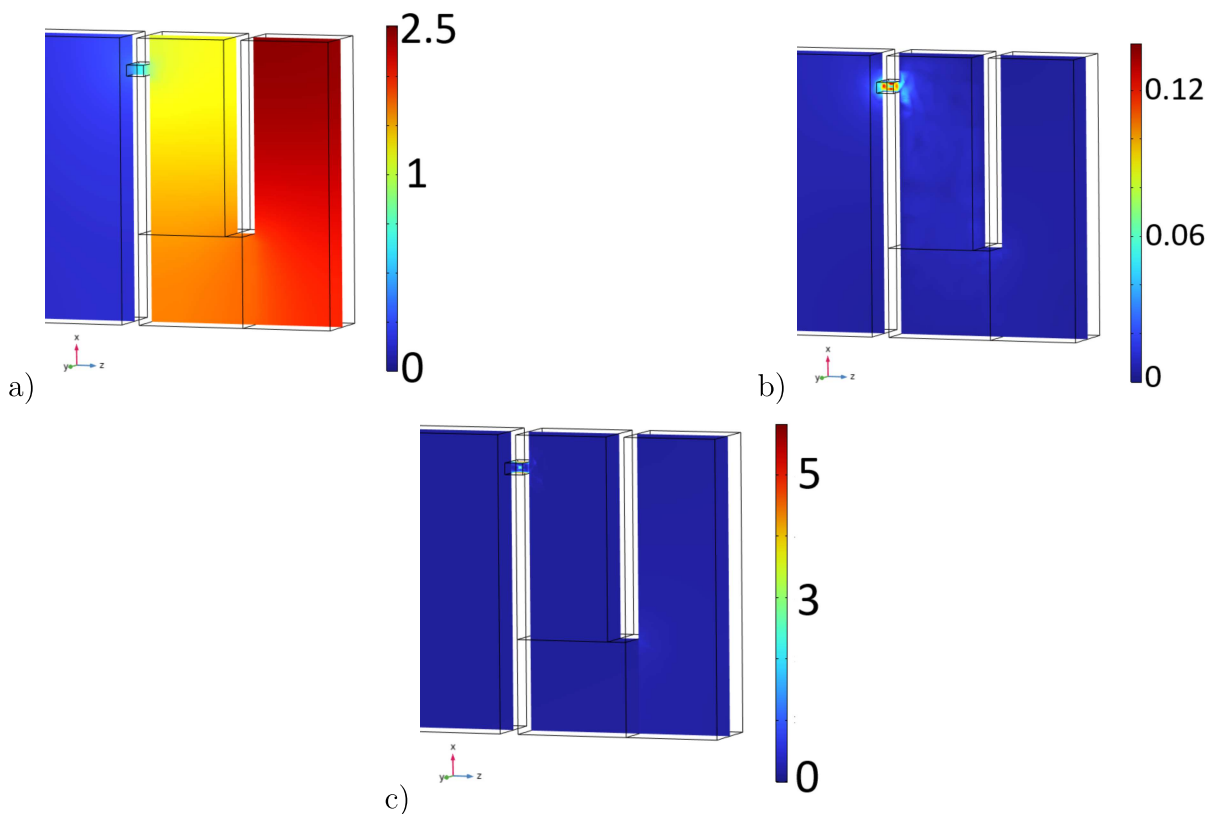
A partir do modelo numérico utilizado, foram obtidos os campos de pressão sonora, velocidade acústica e dissipação térmica dos metamateriais em análise. Esses resultados estão apresentados nas Figuras 63 e 64, demonstrando comportamentos característicos esperados para pressão, velocidade e dissipação. O nível de pressão mais elevado é obser-

Tabela 18 – Indicadores acústicos de desempenho das curvas para A310594 (metamaterial com perfuração fenda).

	Amostra	Freq. Pico (Hz)	$\alpha$ máximo	$Q_\alpha$
Sem material poroso	Analítico	430	0,99	0,26
	Numérico	445	0,98	0,42
	Experimental	445	0,89	0,38
Melamina na pos. 3	Analítico	470	0,99	0,33
	Numérico	460	0,98	0,44
	Experimental	430	0,87	0,35
Lã de PET na pos. 3	AnaI310594lp3	470	0,99	0,33
	NumI310594lp3	480	0,99	0,46
	ExpI310594lp3	450	0,91	0,35

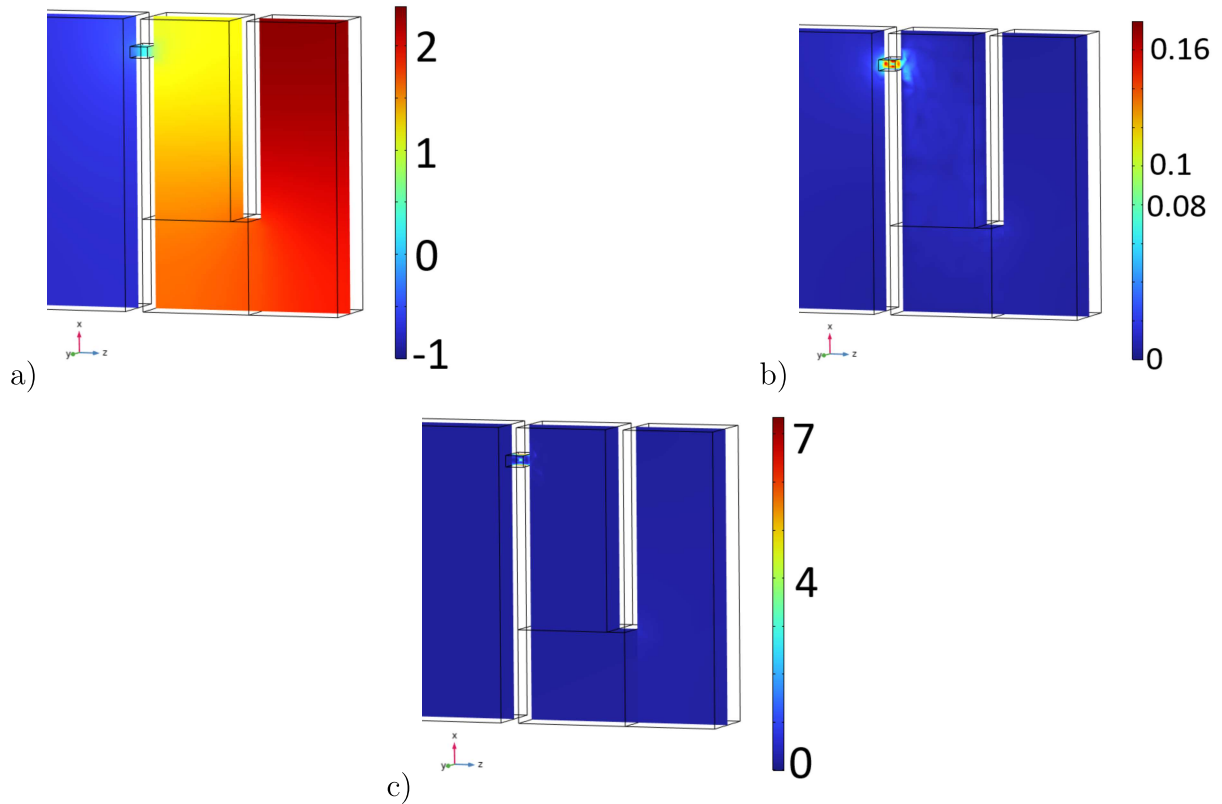
Fonte: O Autor.

vado na parede mais distante da perfuração de entrada, mesmo com o material poroso presente nessa região. As velocidades máximas e a dissipação máxima concentram-se na região estreita, onde a dissipação por viscosidade é dominante, ou seja, na perfuração de entrada.

Figura 63 – Desempenho da amostra I310594mp3 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [Pa]. b) Velocidade acústica instantânea [m/s]. c) Dissipação térmica [W/m<sup>2</sup>].

Fonte: O Autor.

Figura 64 – Desempenho da amostra I310594lp3 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 3) a 450 Hz. a) Pressão acústica [ $Pa$ ]. b) Velocidade acústica instantânea [ $m/s$ ]. c) Dissipação térmica [ $W/m^2$ ].



Fonte: O Autor.

#### 4.2.3.4 Síntese preliminar sobre o material poroso na posição 3 (posterior)

A aplicação do material na posição 3 demonstrou efeitos satisfatórios e semelhantes aos observados na posição 2. Houve a confirmação do aumento da banda de frequência, independentemente do material poroso aplicado. No entanto, foram observadas diferenças significativas ao combinar diferentes geometrias de perfurações de entrada e tipos de materiais porosos com distintos valores de resistividade ao fluxo. Isso resultou em conclusões que indicam a possibilidade de controlar as características acústicas do metamaterial desenvolvido, dependendo das propriedades dos materiais e da geometria de entrada utilizada.

Mais uma vez, a banda de frequência de 50% foi empregada, juntamente com o parâmetro  $Q_\alpha$ , para realizar as análises necessárias e tirar conclusões sobre o aumento ou não da largura de banda absorvida na frequência de análise.

A partir dos modelos numéricos, foi possível observar que os comportamentos dos campos internos dos materiais apresentam poucas diferenças quando um absorvedor poroso é inserido na cavidade. Mesmo assim, esses comportamentos continuam seguindo as principais características esperadas em um metamaterial.

## 5 CONCLUSÃO

Tendo em perspectiva os resultados experimentais e os resultados do modelo de metamaterial acústico labiríntico proposto neste trabalho, aqui são destacadas algumas considerações finais. Os modelos físico-matemáticos e numéricos aplicados aqui demonstram uma boa capacidade de predição do comportamento acústico do metamaterial. Mesmo que os resultados experimentais nem sempre estejam em total concordância com os modelos teóricos, as razões e considerações para isso foram explicadas e detalhadas nas possíveis problemáticas e soluções.

As diversas análises realizadas para descrever o desempenho do metamaterial foram de grande valia para comparações com estudos anteriores, como os realizados por Cassetari (2023) e Almeida (2019), e para buscar novas informações a partir das modificações realizadas. Estas modificações, incluindo a adição de materiais porosos na parte interna do metamaterial, apresentaram resultados favoráveis quando adicionado material na posição 2 ou na posição 3 aumentando a largura de banda de absorção sonora, e resultados desfavoráveis quando aplicado na posição 1 praticamente removendo a capacidade de absorção sonora do metamaterial.

A análise de três posições permitiu conclusões, como o tipo de material poroso indicado para cada posição. Na posição 1 (frontal), observou-se que materiais porosos de menor resistividade ao fluxo apresentam melhor desempenho quando se busca um alto nível de absorção sonora e uma banda larga de frequências de trabalho. Em contraste, o uso de materiais porosos de maior resistência ao fluxo cria uma situação semelhante a uma parede rígida, removendo assim toda a capacidade de um ressonador funcionar como o esperado.

A experimentação nas posições 2 (intermediária) e 3 (posterior) também indicou a possibilidade de uma aplicação bem-sucedida para aumentar a faixa de frequência entre 250 e 550 Hz, mantendo um bom nível de absorção sonora. Isso, é claro, levando sempre em consideração as características dos materiais porosos aplicados, o que pode aprimorar o desempenho do ressonador labiríntico utilizado.

A aplicação de melamina e lã de PET como materiais porosos leva em consideração a facilidade de corte e manuseio desses materiais, já que são materiais comerciais típicos utilizados em tratamentos acústicos. Utilizando conhecimentos já disponíveis sobre esses materiais e aplicando-os em uma nova área, como a dos metamateriais, foi possível melhorar o desempenho de ambos os componentes em determinadas condições de trabalho.

A junção desses materiais em amostras utilizando o método de construção desenvolvido por Cassetari (2023) permitiu a realização de inúmeros testes experimentais, obtendo experimentalmente mais de 60 curvas de absorção. Essa abordagem permitiu alterações de variáveis que, em processos tradicionais como a impressão FDM (*Fused Deposition Modeling* - Modelagem por fusão e deposição), resultariam em custos elevados

e impossibilitariam a construção e utilização de tantas amostras.

Em resumo, o objetivo geral deste trabalho, de propor um absorvedor acústico duplo e ajustável utilizando uma forma construtiva inovadora e aplicando material absorvedor poroso na cavidade enrolada interna, mostrou-se capaz de produzir resultados e controlar as características acústicas do metamaterial em frequências de 200 a 500 Hz, desde que planejado adequadamente e levando em consideração os limites da técnica apresentada.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o decorrer da pesquisa, dúvidas e perguntas surgem que estão fora do escopo do trabalho mas podem gerar novos trabalhos futuros, sendo algumas destacadas a seguir:

- Investigar experimentalmente a substituição completa do ar na cavidade do absorvedor por materiais porosos de diversos tipos (como melamina, lã de PET, lã de rocha), criando também um modelo teórico para esse caso específico;
- Construir amostras para um tubo de impedância de seção transversal quadrada para que haja maior aproveitamento das amostras para que o efeito da razão entre as áreas do absorvedor estudado e a área total da amostra não seja um fator que influencie as curvas dos resultados;
- Construir amostras com matérias primas diferentes do aplicado neste estudo para evitar os efeitos de porosidades intrínsecos do material e investigar experimentalmente, junto de modelos teóricos, os resultados da aplicação de diferentes materiais para o metamaterial;
- Utilizar outros métodos construtivos para novas amostras com material poroso adicionado e comparar as diferenças resultantes para determinar os efeitos nos resultados a partir do método construtivo aplicado;
- Buscar a ampliação da escala e aplicar os metamateriais estudados em problemas de Acústica de salas.



## REFERÊNCIAS

ALLARD, Jean; ATALLA, Noureddine. **Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

ALMEIDA, Gildean do N; VERGARA, Erasmo F; BARBOSA, Leandro R; LENZI, Arcanjo *et al.* Sound absorption metasurface with symmetrical coiled spaces and micro slit of variable depth. **Applied Acoustics**, v. 183, p. 108312, 2021. Publisher: Elsevier.

ALMEIDA, Gildean do N; VERGARA, Erasmo F; BARBOSA, Leandro R; ZANATTA, Lucas R *et al.* COB-2023-0163 Sound energy control in a wide frequency domain by a hybrid acoustic material.

ALMEIDA, Gildean do Nascimento. **Análise de um metamaterial acústico do tipo labiríntico na absorção sonora de baixas frequências**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ARENAS, Jorge P; CROCKER, Malcolm J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. **Sound & vibration**, v. 44, n. 7, p. 12–18, 2010. Publisher: Acoustic Publications Inc., P. O. Box 40416 Bay Village Ohio 44140 USA.

ATALLA, Youssef; PANNETON, Raymond. Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements. **Canadian acoustics**, v. 33, n. 1, p. 11–24, 2005.

ATTENBOROUGH, Keith. Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. **the Journal of the Acoustical Society of America**, v. 73, n. 3, p. 785–799, 1983. Publisher: Acoustical Society of America.

BALVEDI, Alessandro Mattiuzi. **Medição e simulação acústica de materiais porosos e sistemas multicamadas**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BARBOSA, Leandro Rodrigues *et al.* Uso de materiais acústicos metálicos em filtros de descarga de sistemas de refrigeração, 2017.

BASU, Dipak *et al.* **Dictionary of pure and applied physics**. [S.l.]: CRC press, 2018.

BERANEK, Leo Leroy; MELLOW, Tim. **Acoustics: sound fields and transducers**. [S.l.]: Academic Press, 2012.

CASSETARI, Iago. **Aplicação da Técnica de Corte a Laser e Camadas Justapostas para Avaliação de Metamateriais Absorvedores Acústicos do Tipo Labiríntico**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CAVALHEIRO, Thiago. **ESTUDO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO VIBROACÚSTICO DE PAINÉIS DUPLOS AERONÁUTICOS COM ENFOQUE EM REDUÇÃO DE ORDEM DE MODELO**. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CHAMPOUX, Yvan; ALLARD, Jean-F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. **Journal of applied physics**, v. 70, n. 4, p. 1975–1979, 1991. Publisher: American Institute of Physics.

COX, Trevor; D'ANTONIO, Peter. **Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application**. [S.l.]: CRC press, 2016.

CRANDALL, Irving Bardshar. **Theory of vibrating systems and sound**. [S.l.]: D. Van Nostrand Company, 1926.

CRASTER, Richard V; GUENNEAU, Sébastien. **Acoustic metamaterials: negative refraction, imaging, lensing and cloaking**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 166.

DEYMIER, Pierre A. **Acoustic metamaterials and phononic crystals**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. v. 173.

DOUTRES, Olivier *et al.* Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. **Applied acoustics**, v. 71, n. 6, p. 506–509, 2010. Publisher: Elsevier.

EGAN, David. **Architectural Acoustics. Fort Lauderdale: J.** [S.l.]: Ross Publishing, 2007.

FAHY, Frank J. **Foundations of engineering acoustics**. [S.l.]: Elsevier, 2000.

FARIAS, Lincoln César Bastos. **Metamaterial acústico baseado em painéis micro perfurados de camada dupla para absorção em baixas frequências**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GAN, Woon Siong. **New acoustics based on metamaterials**. [S.l.]: Springer, 2018.

GHANBARIAN, Behzad *et al.* Tortuosity in porous media: a critical review. **Soil science society of America journal**, v. 77, n. 5, p. 1461–1477, 2013. Publisher: Wiley Online Library.

GROBY, J-P *et al.* Analytical method for the ultrasonic characterization of homogeneous rigid porous materials from transmitted and reflected coefficients. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 127, n. 2, p. 764–772, 2010. Publisher: AIP Publishing.

HIROSAWA, Kunikazu. Numerical study on the influence of fiber cross-sectional shapes on the sound absorption efficiency of fibrous porous materials. **Applied Acoustics**, v. 164, p. 107222, 2020. Publisher: Elsevier.

HONORATO, Ana Maria Borges. **Avaliação de modelos analíticos para a determinação da absorção sonora de materiais poroelásticos**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

HUSSEIN, Mahmoud I; LEAMY, Michael J; RUZZENE, Massimo. Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress, and future outlook. **Applied Mechanics Reviews**, American Society of Mechanical Engineers, v. 66, n. 4, p. 040802, 2014.

INGARD, Uno. **Noise reduction analysis**. [S.l.]: Jones & Bartlett Publishers, 2009.

JACOBSEN, Finn *et al.* **Fundamentals of acoustics and noise control**. [S.l.]: Note, 2011.

JI, Guosheng; FANG, Yi *et al.* Porous labyrinthine acoustic metamaterials with high transmission loss property. **Journal of Applied Physics**, v. 125, n. 21, 2019. Publisher: AIP Publishing.

JI, Guosheng; HUBER, John. Recent progress in acoustic metamaterials and active piezoelectric acoustic metamaterials-a review. **Applied Materials Today**, v. 26, p. 101260, 2022. Publisher: Elsevier.

JIMÉNEZ, Noé *et al.* Quasiperfect absorption by subwavelength acoustic panels in transmission using accumulation of resonances due to slow sound. **Physical Review B**, v. 95, n. 1, p. 014205, 2017. Publisher: APS.

JOHNSON, David Linton; KOPLIK, Joel; DASHEN, Roger. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. **Journal of fluid mechanics**, v. 176, p. 379–402, 1987. Publisher: Cambridge University Press.

KIM, Bo-Seung; PARK, Junhong. Double resonant porous structure backed by air cavity for low frequency sound absorption improvement. **Composite Structures**, v. 183, p. 545–549, 2018. Publisher: Elsevier.

KULAKAUSKAS, Fábio Luis Val Quintans. **AValiaÇÃO DO USO DE MATERIAIS POROSOS NA PERDA DE TRANSMISSÃO DE PAINÉIS DUPLOS**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LEE, Taehwa; NOMURA, Tsuyoshi; IIZUKA, Hideo. Damped resonance for broadband acoustic absorption in one-port and two-port systems. **Scientific reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 9, n. 1, p. 13077, 2019.

LIU, Xuewei; YU, Chenlei; XIN, Fengxian. Gradually perforated porous materials backed with Helmholtz resonant cavity for broadband low-frequency sound absorption. **Composite Structures**, v. 263, p. 113647, 2021. Publisher: Elsevier.

LIU, Xuewei *et al.* Acoustic labyrinthine porous metamaterials for subwavelength low-frequency sound absorption. **Journal of Applied Physics**, v. 129, n. 19, 2021. Publisher: AIP Publishing.

LIU, Zhengyou *et al.* Locally resonant sonic materials. **science**, v. 289, n. 5485, p. 1734–1736, 2000. Publisher: American Association for the Advancement of Science.

LOVELOCK, Ruth Kathleen. **Acoustic Metamaterials: ‘The Influence of Boundary Effects on Resonant Acoustic Transmission through a Thin Slit’**. [S.l.]: University of Exeter (United Kingdom), 2014.

MAA, D-Y. Theory of microslit absorbers. **ACTA ACUSTICA-PEKING-**, SCIENCE PRESS, v. 25, n. 6, p. 481–485, 2000.

MORAES, E Guzi de *et al.* Innovative thermal and acoustic insulation foam by using recycled ceramic shell and expandable styrofoam (EPS) wastes. **Waste management**, v. 89, p. 336–344, 2019. Publisher: Elsevier.

MULTIPHYSICS, COMSOL. **Acoustics module User’s Guide**. [S.l.]: COMSOL, 2023.

OMS. **Environmental noise guidelines for the european region**. [S.l.]: OMS, 2018.

PAI, P Frank; HUANG, Guoliang. Theory and design of acoustic metamaterials. (**No Title**), 2015.

PENDRY, John Brian. Negative refraction makes a perfect lens. **Physical review letters**, v. 85, n. 18, p. 3966, 2000. Publisher: APS.

REN, Shuwei *et al.* Broadband low-frequency sound absorbing metastructures composed of impedance matching coiled-up cavity and porous materials. **Applied Acoustics**, v. 200, p. 109061, 2022. Publisher: Elsevier.

ROMERO-GARCIA, Vicente; HLADKY-HENNION, Anne-Christine. **Fundamentals and applications of acoustic metamaterials: from seismic to radio frequency**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.

RUIZ VILLAMIL, Heidi. **Acoustic properties of microperforated panels and their optimization by simulated annealing**. 2012. Tese (Doutorado) – Industriales.

SMITH, David Richard; LIU, Ruopeng; CUI, Tie Jun. **Metamaterials: theory, design, and applications**. [S.l.]: Springer US, 2010.

SONG, Bryan H; BOLTON, J Stuart. A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 107, n. 3, p. 1131–1152, 2000. Publisher: Acoustical Society of America.

VER, Istvan L; BERANEK, Leo L; BURROUGHS, Courtney B. Noise and vibration control engineering. **Noise Control Engineering Journal**, v. 56, n. 4, p. 310–312, 2008. Publisher: Institute of Noise Control Engineering.

VERGARA, EF *et al.* Broadband and low-frequency sound absorption of modified Helmholtz resonator combined with porous layer addition. **Journal of Applied Physics**, v. 132, n. 13, 2022. Publisher: AIP Publishing.

WANG, Guan *et al.* Investigation on low frequency acoustic characteristics of parallel-arranged microperforated panel with aerogel-filled back cavities. **Applied Acoustics**, v. 207, p. 109347, 2023. Publisher: Elsevier.

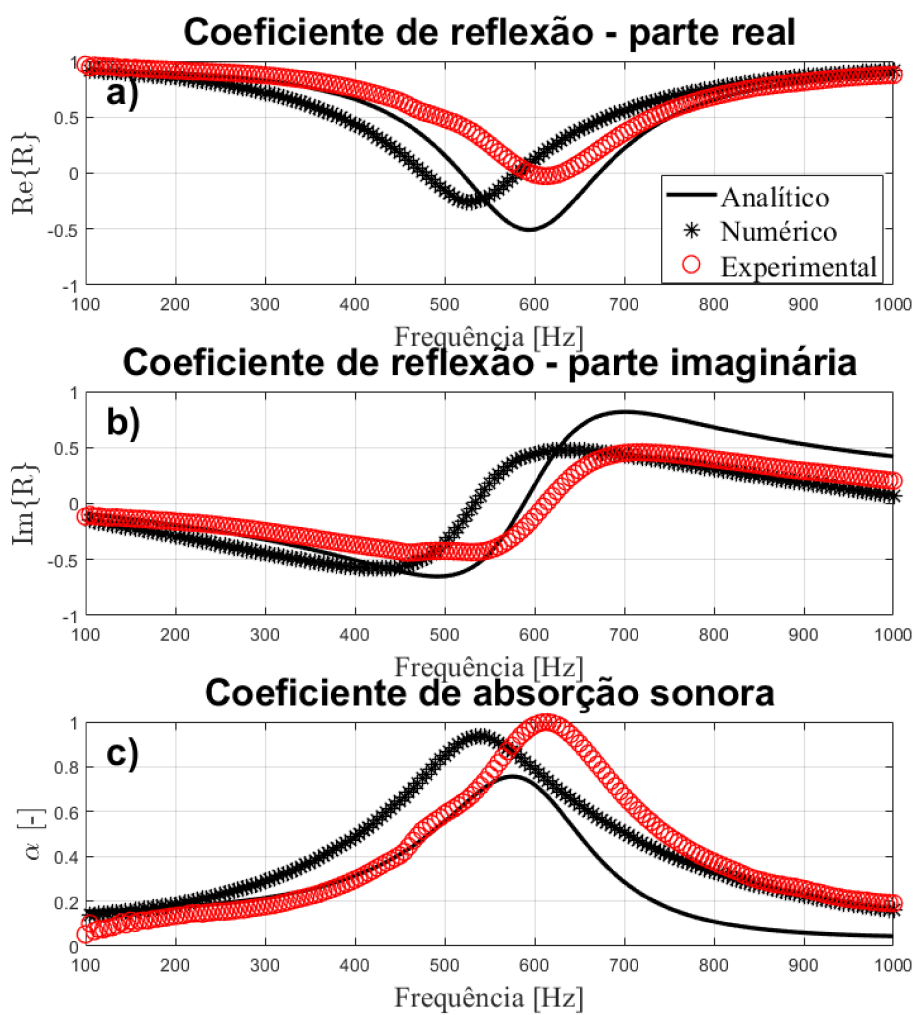
WANG, Yang *et al.* A space-coiled acoustic metamaterial with tunable low-frequency sound absorption. **Europhysics Letters**, v. 120, n. 5, p. 54001, 2018. Publisher: IOP Publishing.

ZHANG, Weitao; XIN, Fengxian. Coiled-up structure with porous material lining for enhanced sound absorption. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 256, p. 108480, 2023. Publisher: Elsevier.

ZIELIŃSKI, Tomasz G. Normalized inverse characterization of sound absorbing rigid porous media. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 137, n. 6, p. 3232–3243, 2015. Publisher: AIP Publishing.

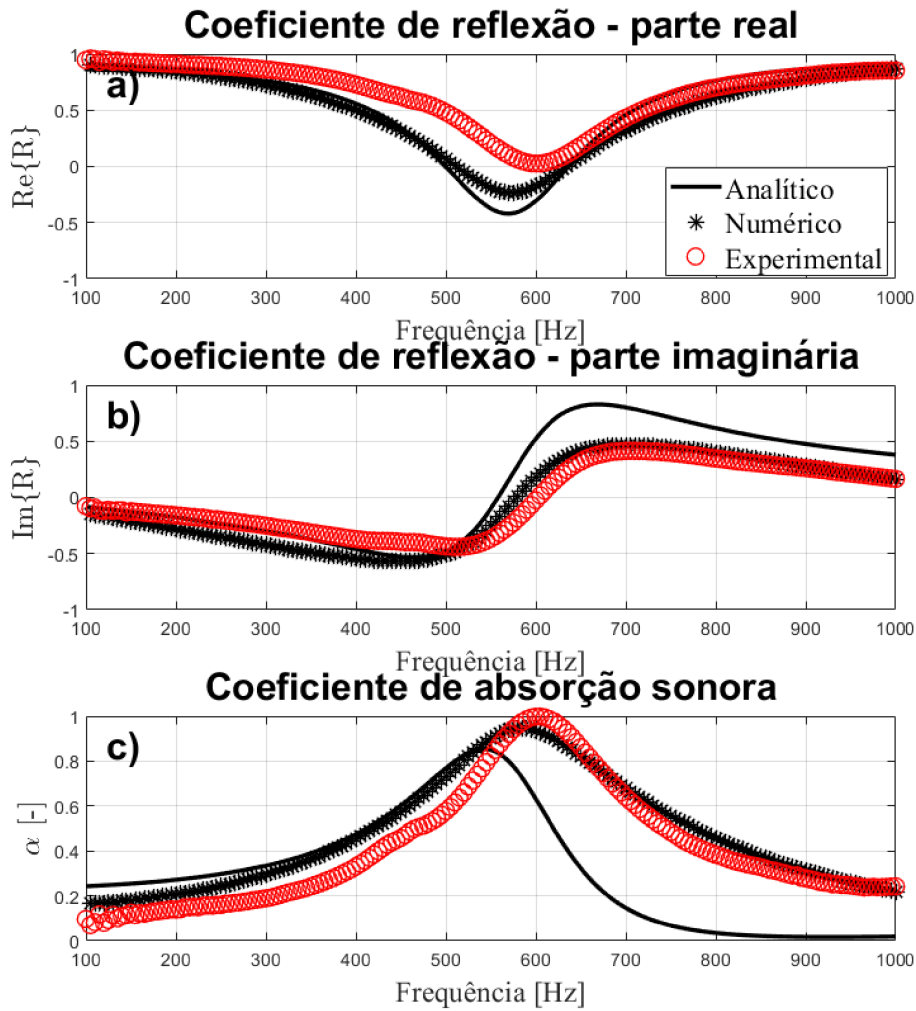
## APÊNDICE A – CURVAS DE DESEMPENHO ACÚSTICO DOS METAMATERIAIS SEM MATERIAL POROSO

Figura 65 – Desempenho da amostra A110481 (metamaterial com perfuração quadrada). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



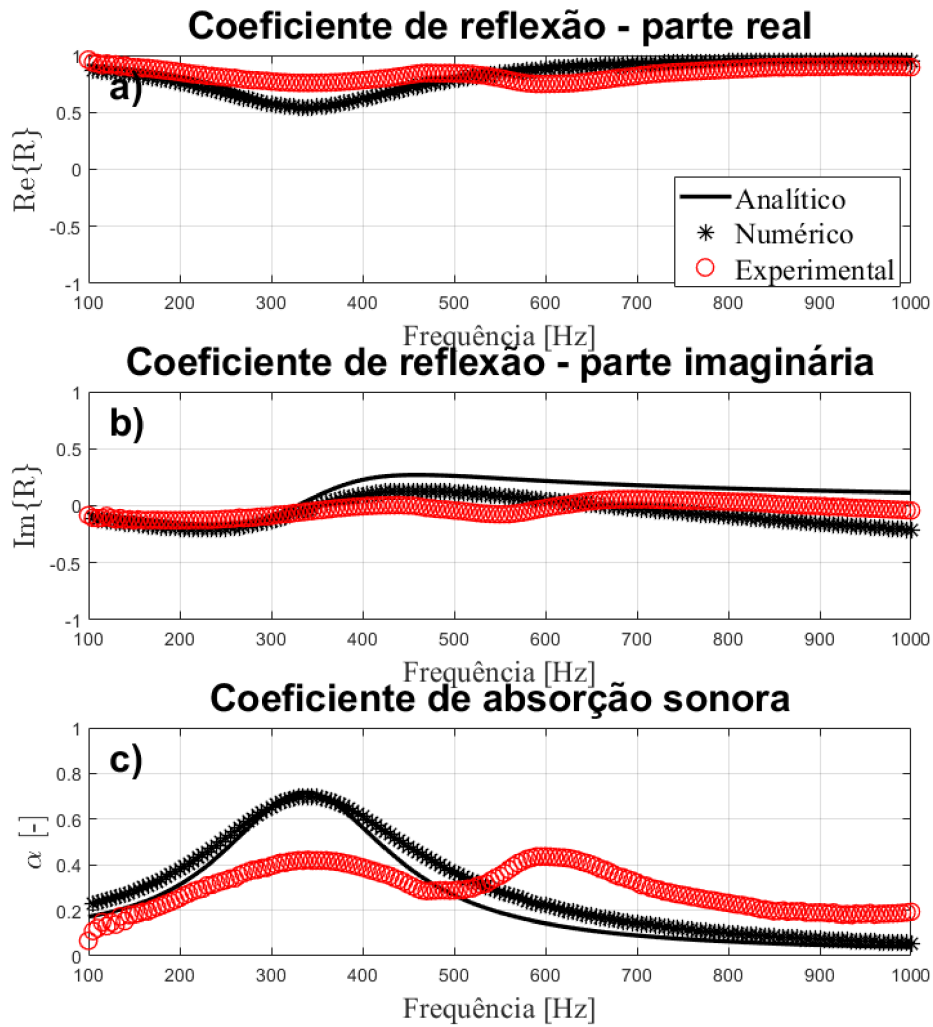
Fonte: O Autor.

Figura 66 – Desempenho da amostra A210571 (metamaterial com perfuração circular). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Figura 67 – Desempenho da amostra A310942 (metamaterial com perfuração fenda). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.

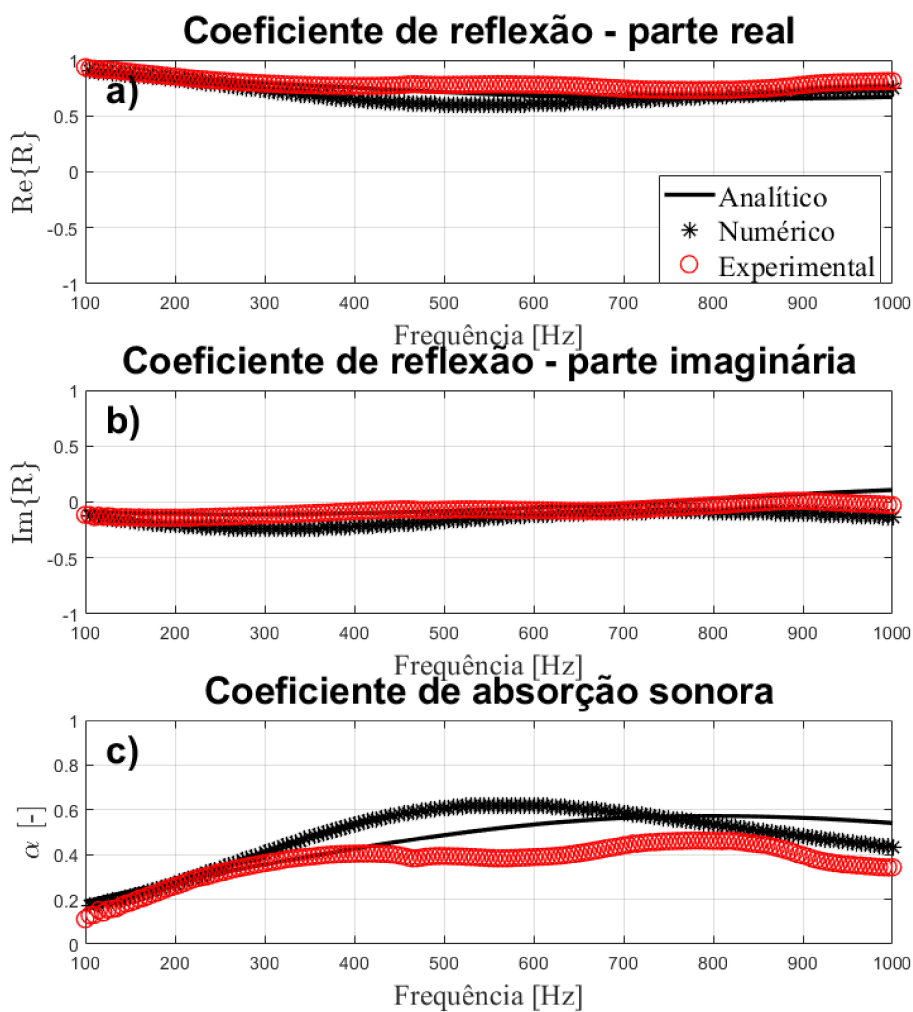


Fonte: O Autor.



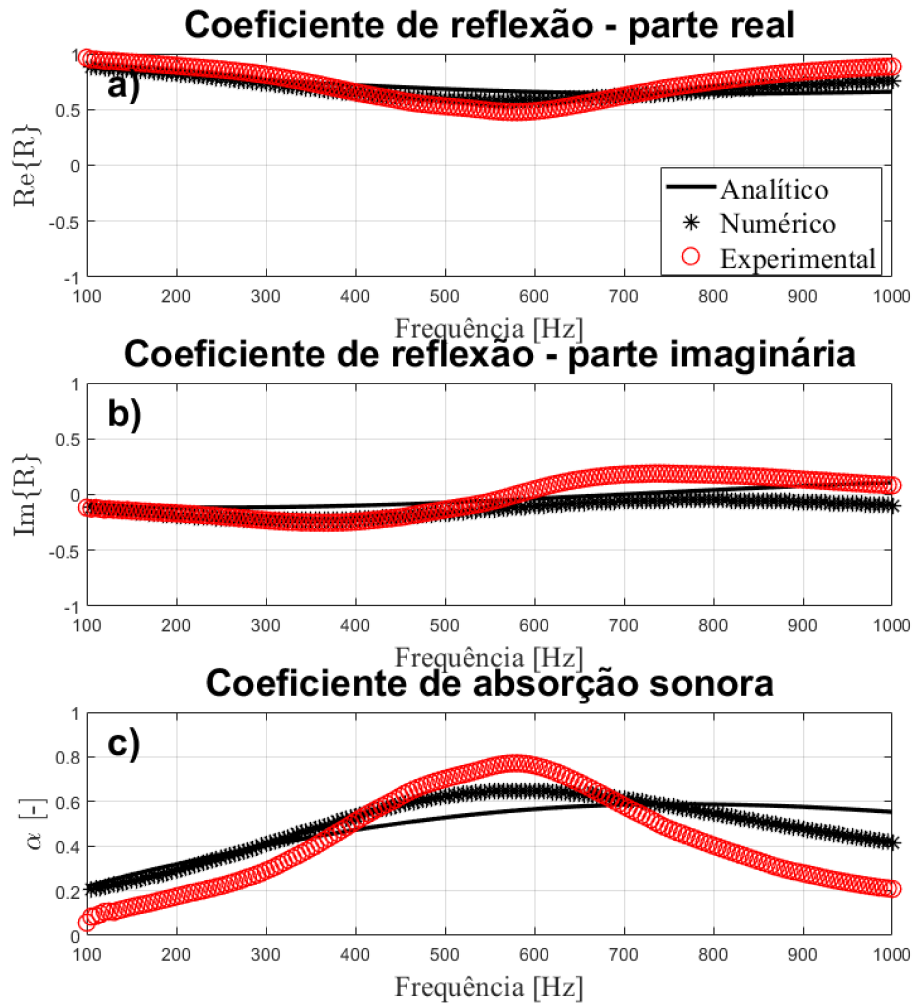
## APÊNDICE B – CURVAS DE DESEMPENHO ACÚSTICO DOS METAMATERIAIS COM MATERIAL POROSO NA POSIÇÃO 1 (FRONTAL)

Figura 68 – Desempenho da amostra A110481mp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



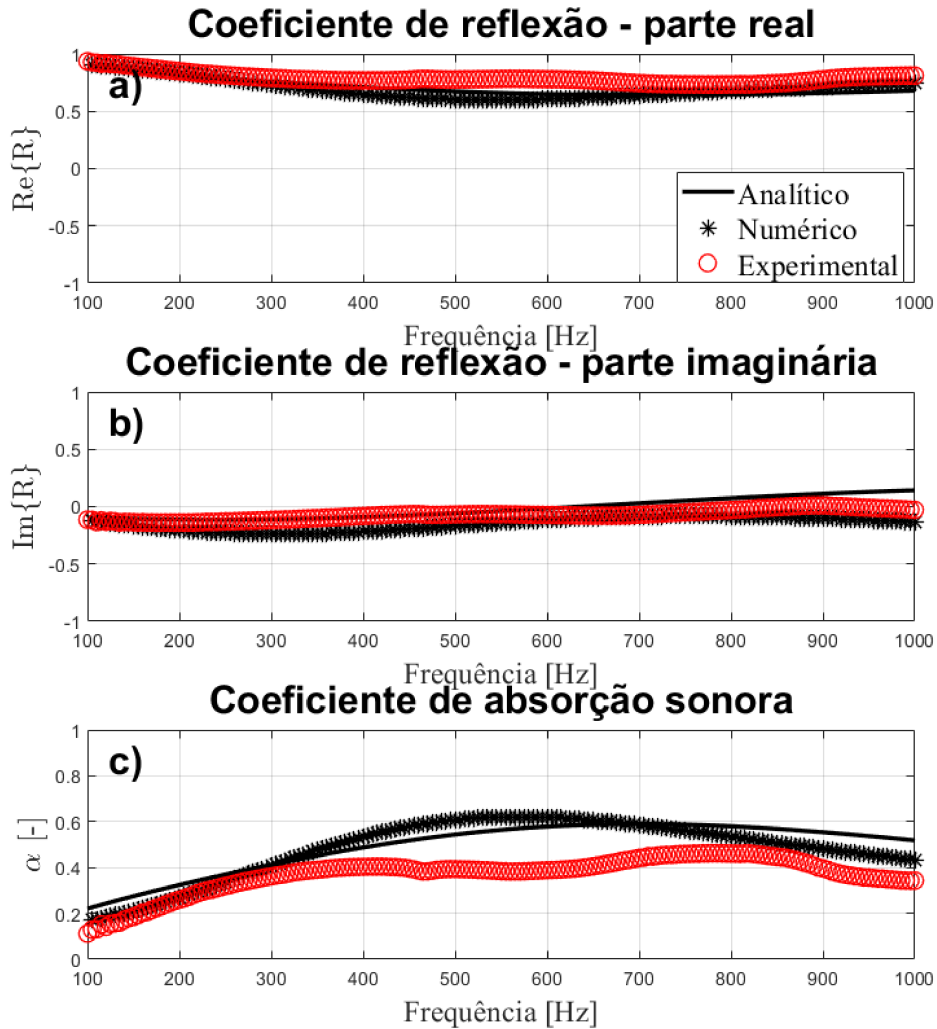
Fonte: O Autor.

Figura 69 – Desempenho da amostra A110481lp1 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



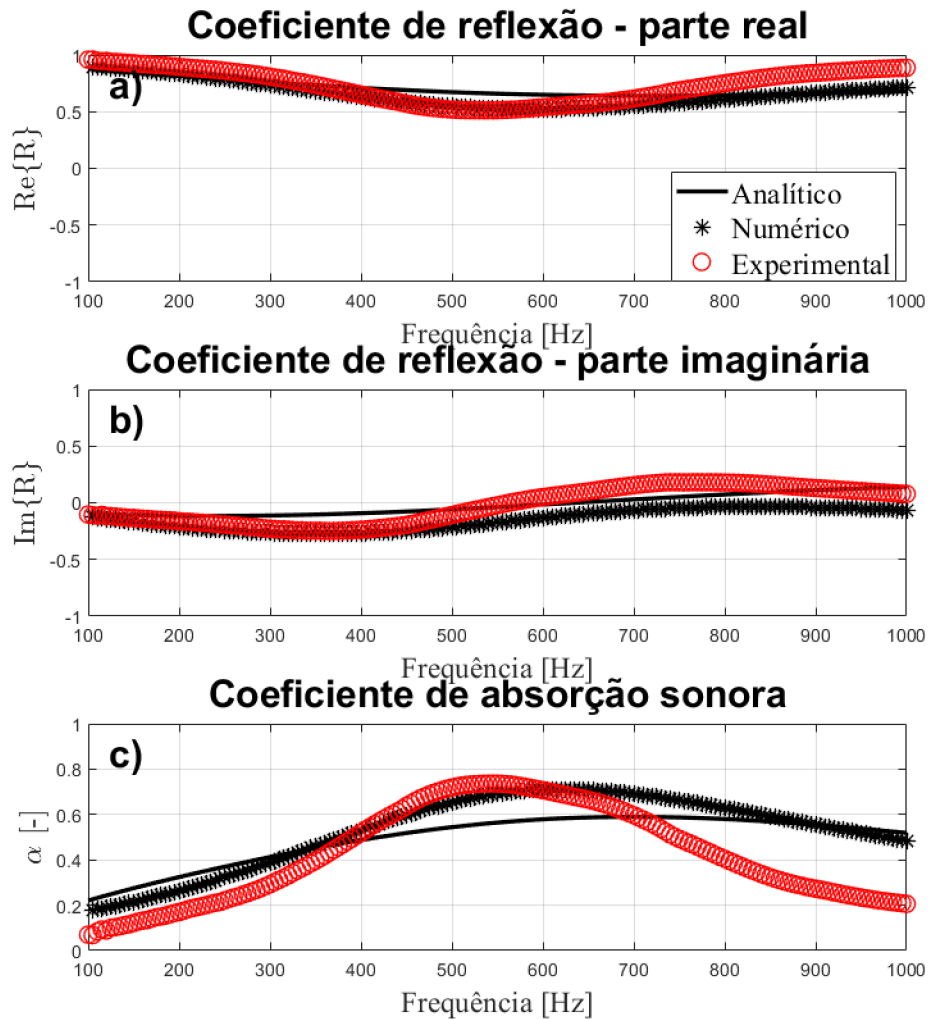
Fonte: O Autor.

Figura 70 – Desempenho da amostra A210571mp1 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



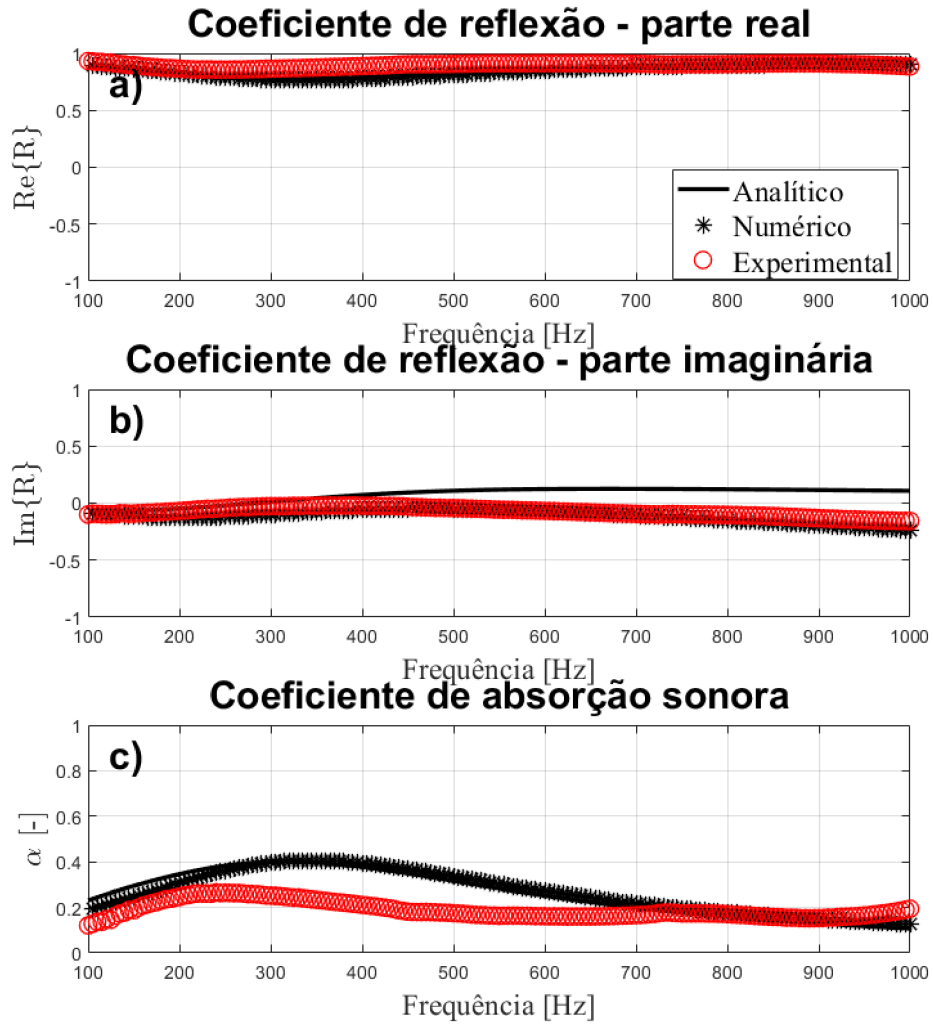
Fonte: O Autor.

Figura 71 – Desempenho da amostra A210571lp1 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



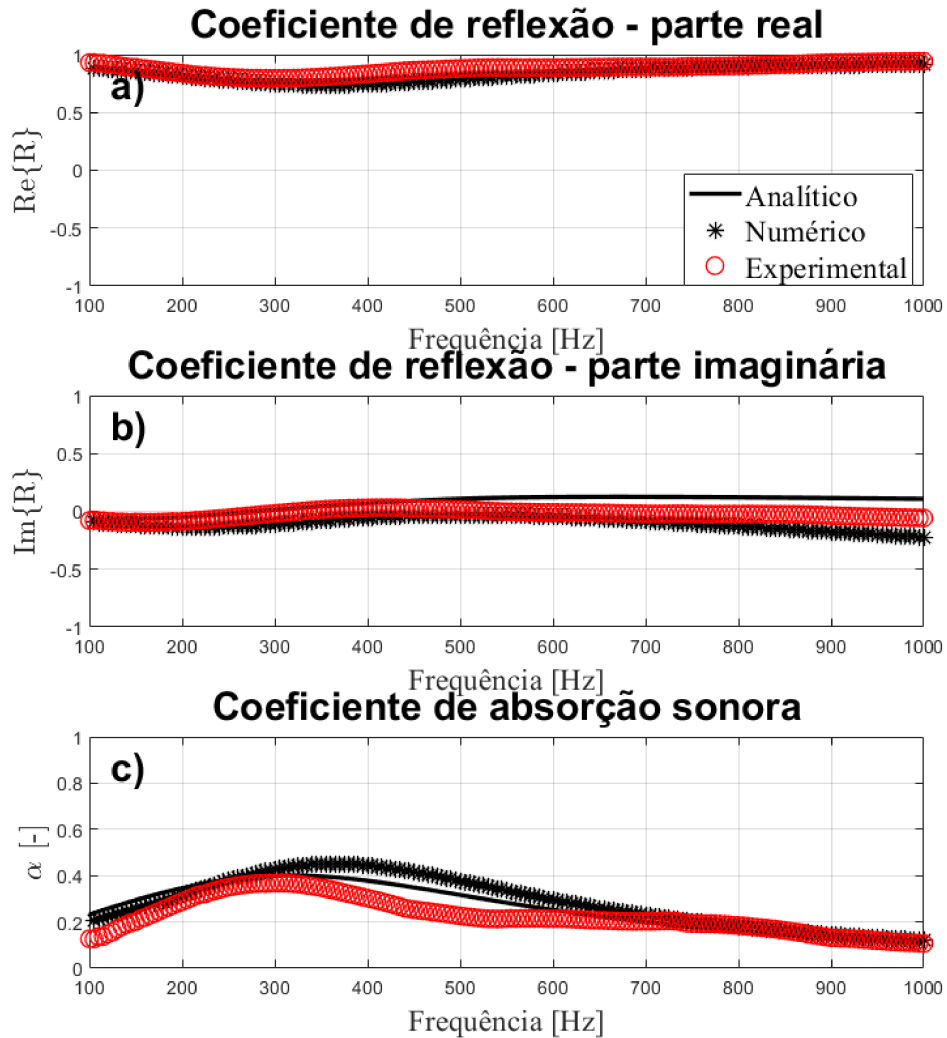
Fonte: O Autor.

Figura 72 – Desempenho da amostra A310942mp1 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

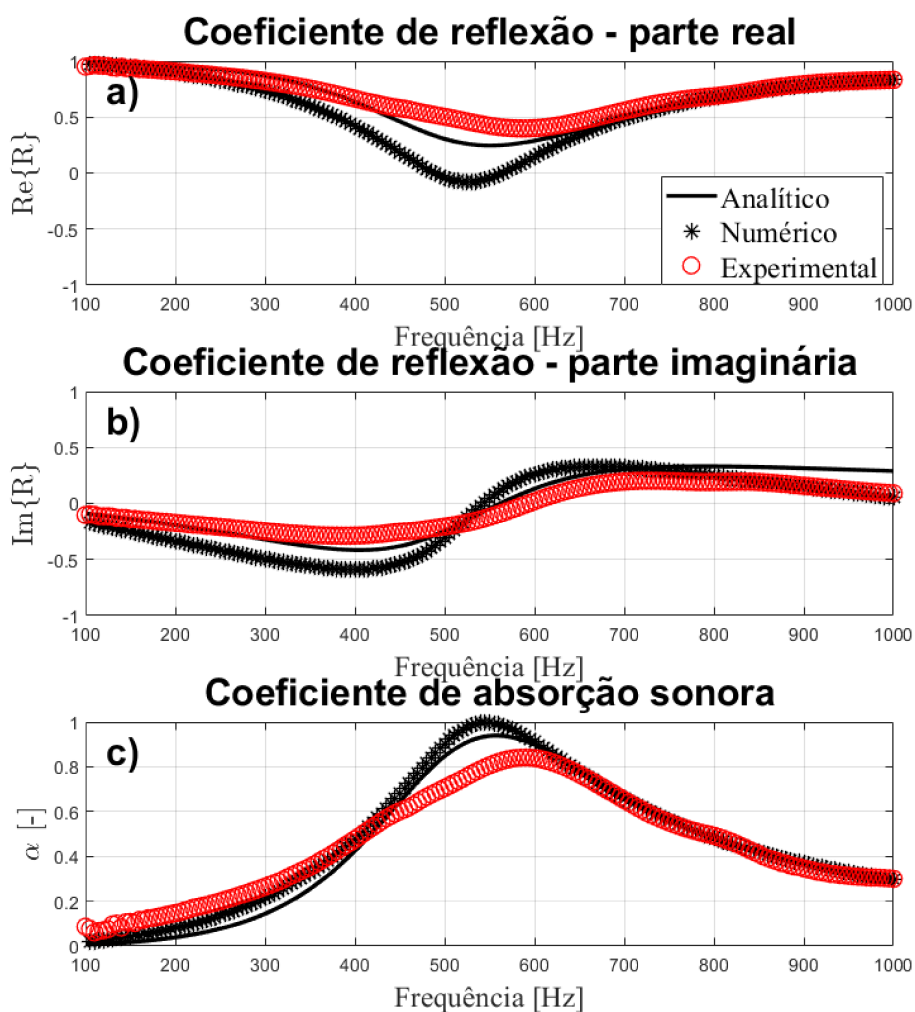
Figura 73 – Desempenho da amostra A310942lp1 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 1). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

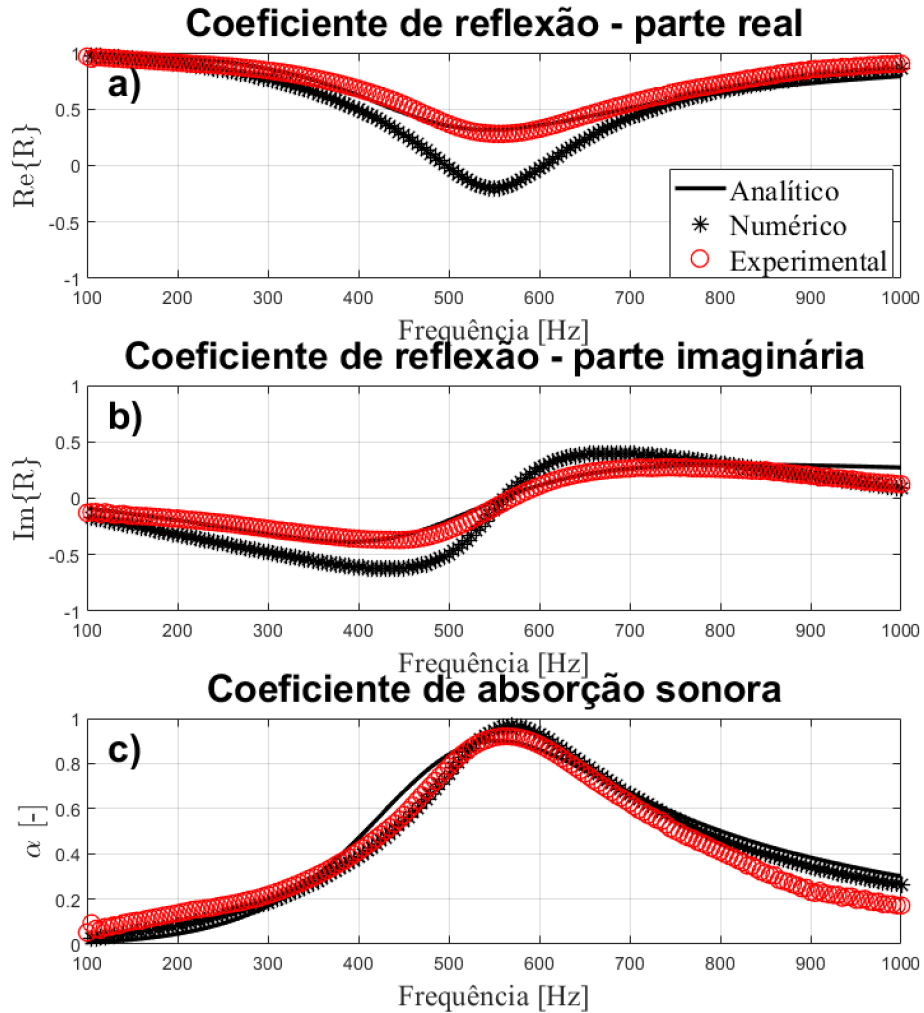
**APÊNDICE C – CURVAS DE DESEMPENHO ACÚSTICO DOS  
METAMATERIAIS COM MATERIAL POROSO NA POSIÇÃO 2  
(INTERMEDIÁRIA)**

Figura 74 – Desempenho da amostra A110481mp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

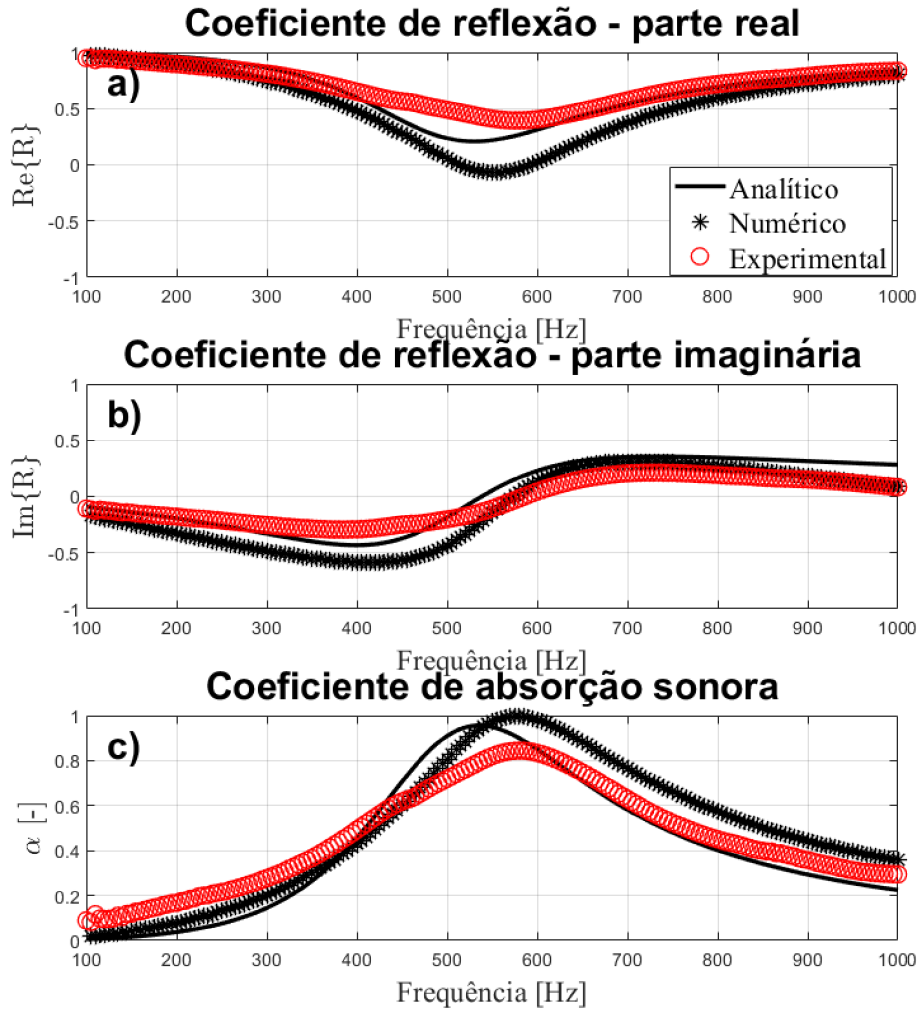
Figura 75 – Desempenho da amostra A110481lp2 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

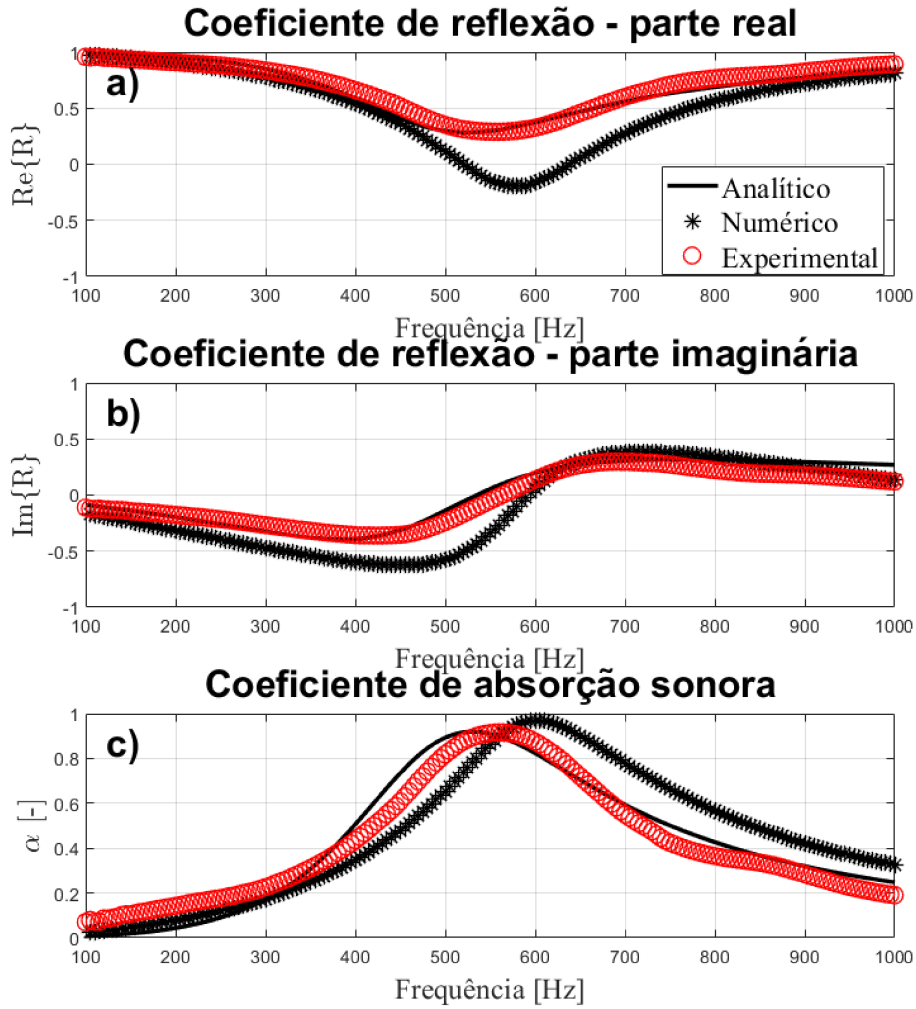


Figura 76 – Desempenho da amostra A210571mp2 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



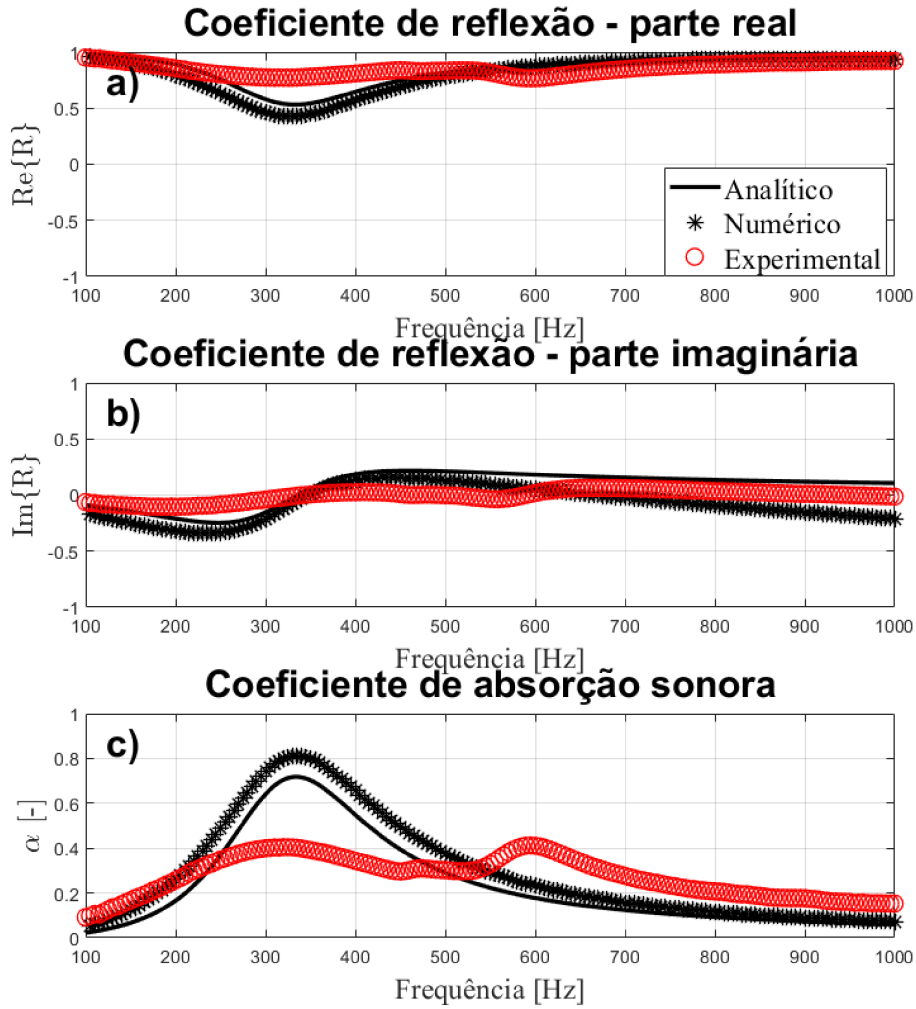
Fonte: O Autor.

Figura 77 – Desempenho da amostra A210571lp2 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



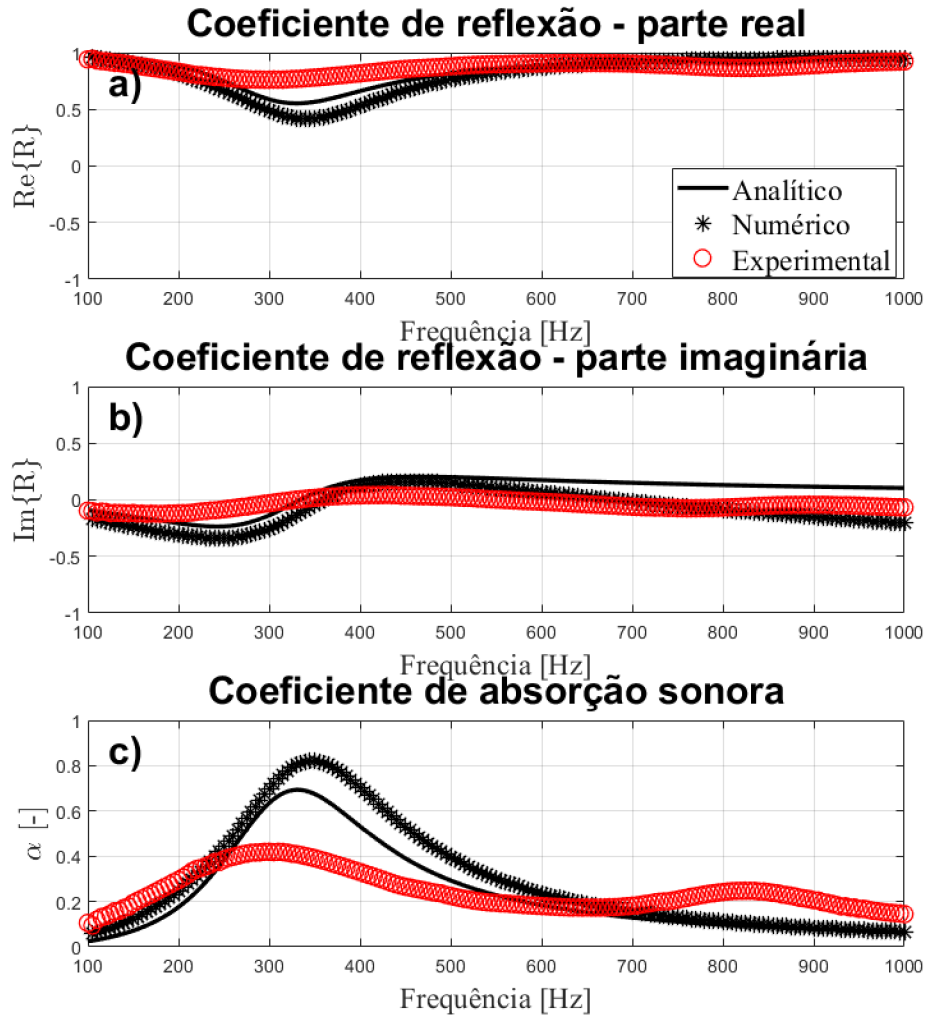
Fonte: O Autor.

Figura 78 – Desempenho da amostra A310942mp2 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

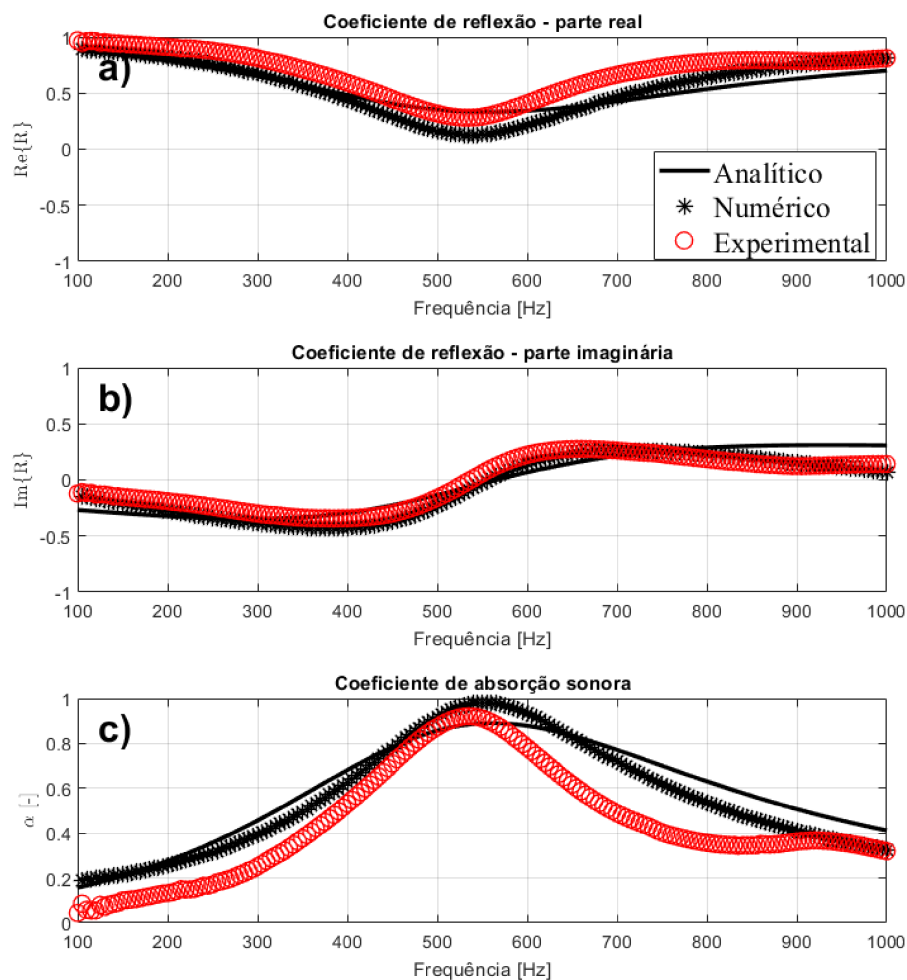
Figura 79 – Desempenho da amostra A310942lp2 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 2). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

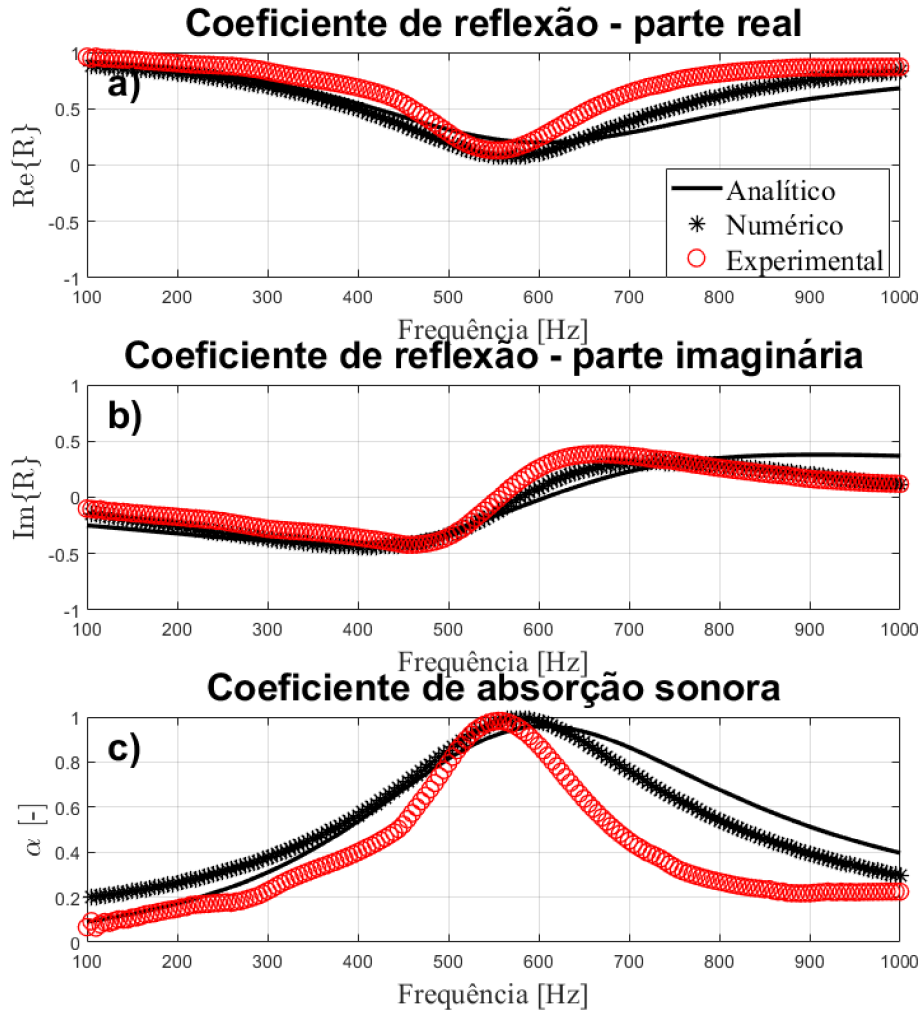
## APÊNDICE D – CURVAS DE DESEMPENHO ACÚSTICO DOS METAMATERIAIS COM MATERIAL POROSO NA POSIÇÃO 3 (POSTERIOR)

Figura 80 – Desempenho da amostra A110481mp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



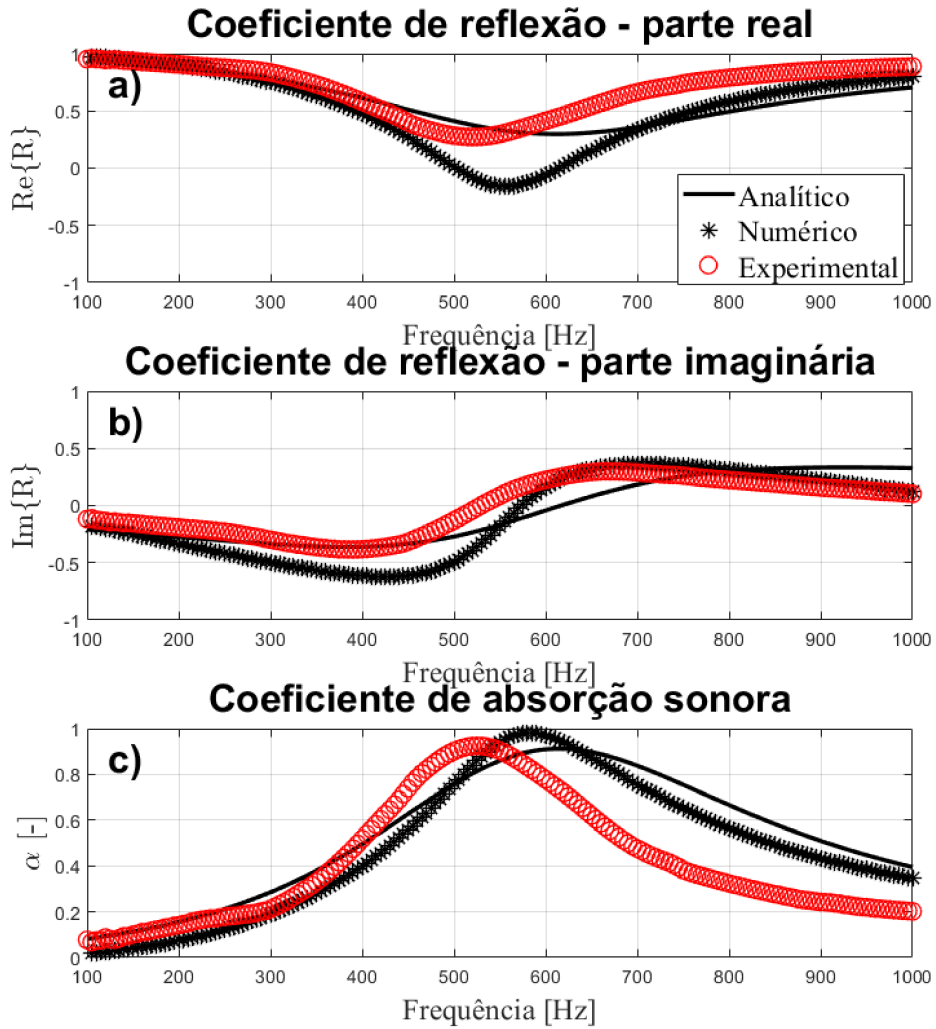
Fonte: O Autor.

Figura 81 – Desempenho da amostra A110481lp3 (metamaterial com perfuração quadrada e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



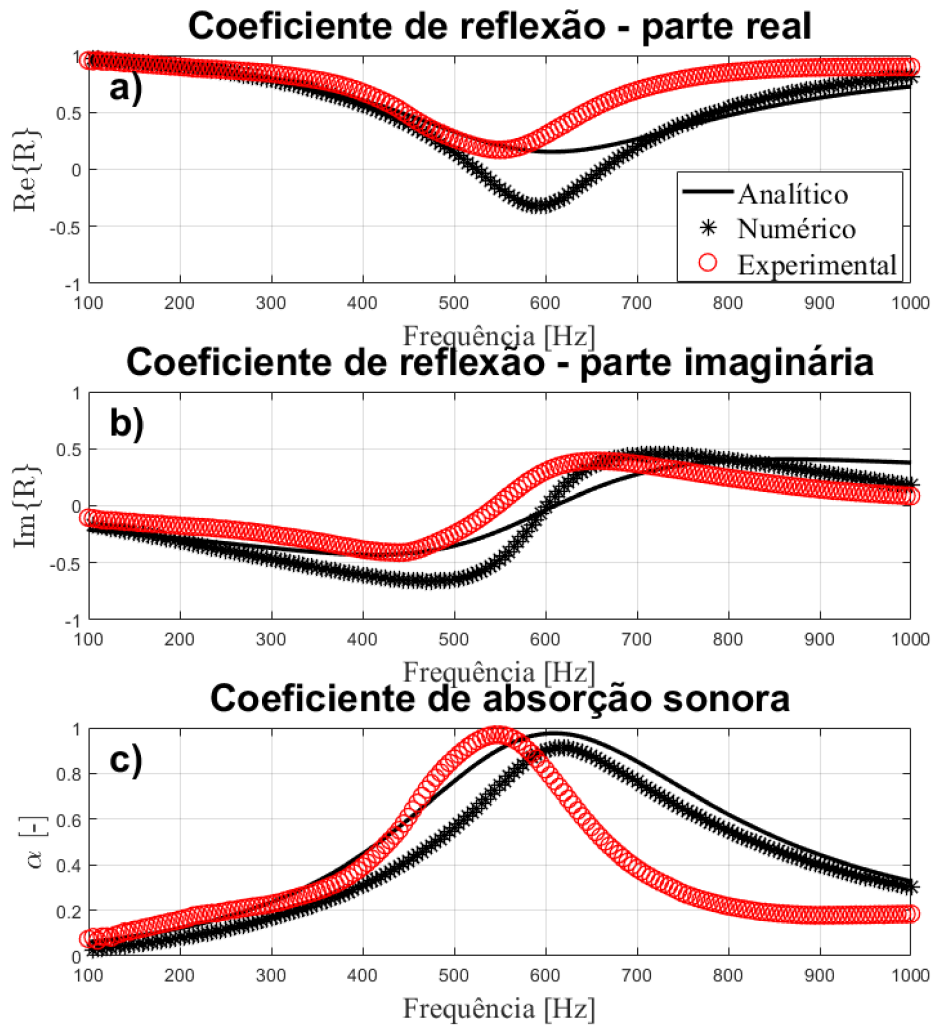
Fonte: O Autor.

Figura 82 – Desempenho da amostra A210571mp3 (metamaterial com perfuração circular e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

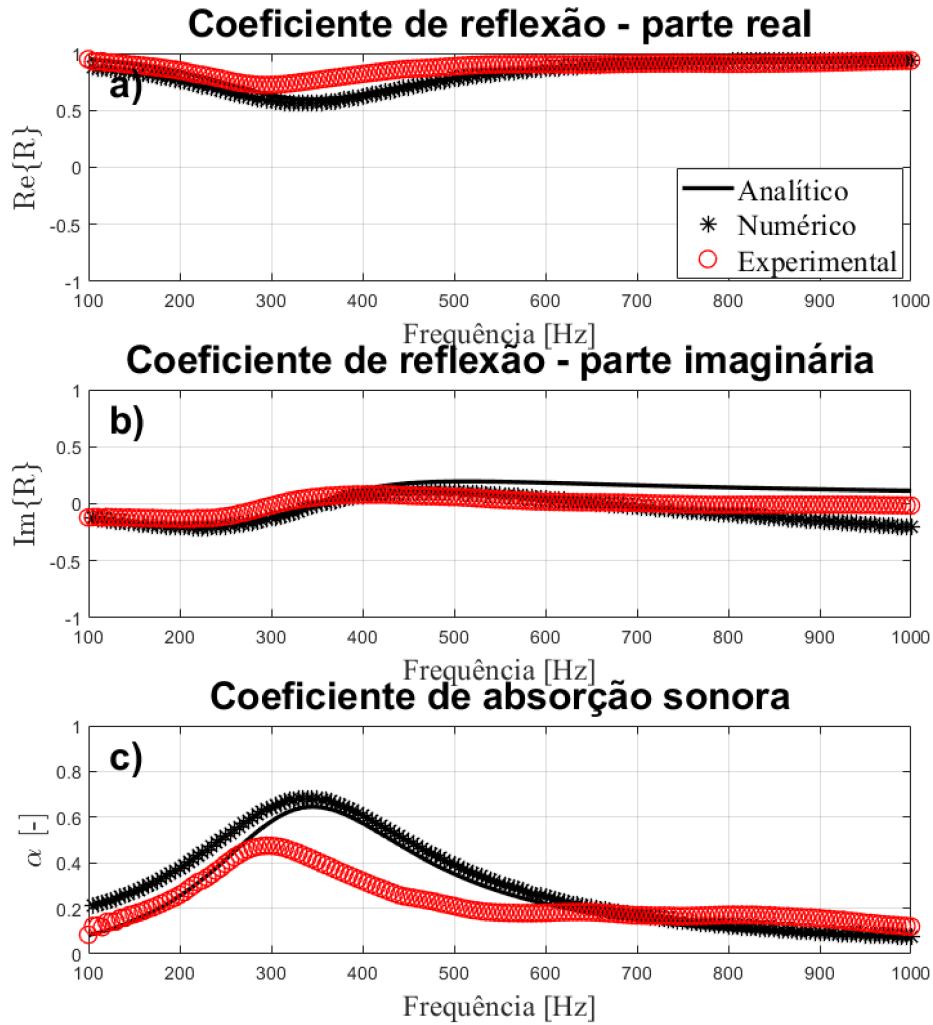
Figura 83 – Desempenho da amostra A210571lp3 (metamaterial com perfuração circular e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

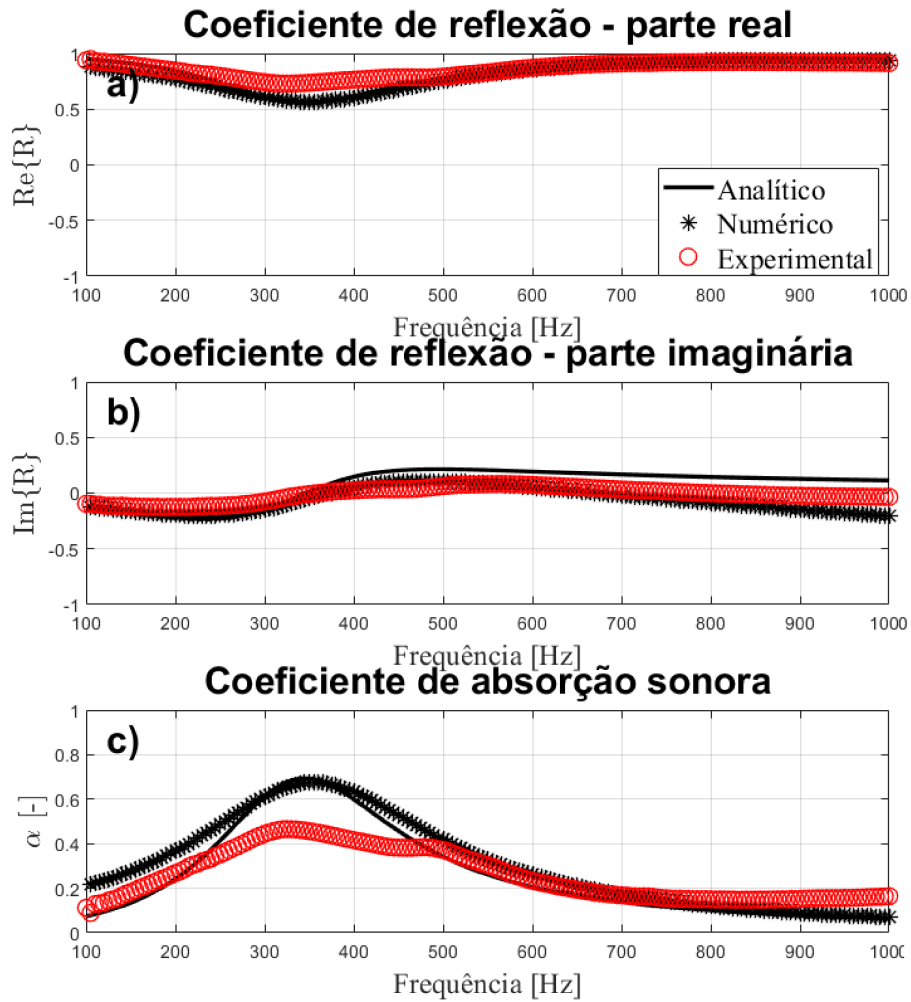


Figura 84 – Desempenho da amostra A310942mp3 (metamaterial com perfuração fenda e com melamina na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.

Figura 85 – Desempenho da amostra A310942lp3 (metamaterial com perfuração fenda e com lã de PET na posição 3). a) Coeficiente de reflexão sonora, parte real. b) Coeficiente de reflexão sonora, parte imaginária. c) Absorção sonora.



Fonte: O Autor.