Análise numérica de elementos casadores de impedância para melhoria da absorção acústica

Almeida, A. H. Q.[1]; Oliveira, U. D.[2]; Rocha, R.[3]; Guimarães, G. P.[3]

[1] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, andre.almeida.102526@ga.ita.br

[2] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, ulisses.oliveira@aluno.ufop.edu.br

[3] Departamento do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, {rocha, gustavo.paulinelli}@ufop.edu.br

Resumo

Os metamateriais acústicos oferecem propriedades únicas para o controle de ondas sonoras, destacando-se o conceito de *acoustic black hole* (ABH), que utiliza a manipulação geométrica e material para capturar e dissipar energia. Este trabalho propõe o desenvolvimento de topologias de elementos casadores de impedância, fundamentadas na variação radial das propriedades acústicas efetivas por meio de alterações na geometria e na fração de preenchimento da estrutura. As estruturas consistem em camadas concêntricas de material sólido e ar, formando um arranjo cilíndrico projetado para realizar o casamento de impedância entre o meio externo e um núcleo de absorção resistiva. Por meio de simulações numéricas realizadas no software Ansys, avaliou-se a influência do dispositivo sobre o nível de pressão sonora em função da frequência, visando investigar seu potencial para aplicações em controle de ruído. Os resultados indicam que a presença do dispositivo modifica significativamente a resposta acústica do sistema, proporcionando reduções do nível de pressão sonora em determinadas frequências. Além disso, observou-se que a variação do número de camadas influencia a magnitude da resposta acústica e a posição dos picos de ressonância, evidenciando o potencial da abordagem para aplicações em controle de ruído.

Palavras-chave: metamateriais acústicos, *acoustic black hole* (ABH), casamento de impedância, método dos elementos finitos (MEF)

Numerical analysis of impedance matching elements for improved sound absorption.

Abstract

Acoustic metamaterials offer unique properties for controlling sound waves, notably the concept of the Acoustic Black Hole (ABH), which uses geometric and material manipulation to capture and dissipate energy. This work proposes the development of impedance-matching element topologies based on the radial variation of effective acoustic properties through changes in the geometry and filling fraction of the structure. structures consist of concentric layers of solid material and air, forming a cylindrical arrangement designed to perform impedance matching between the external medium and a resistive absorption core. Numerical simulations were performed using Ansys to evaluate the influence of the device on sound pressure levels as a function of frequency, aiming to investigate its potential for noise control applications. The results indicate that the presence of the device significantly modifies the acoustic response of the system, reducing sound pressure levels at specific frequencies. Furthermore, the number of layers was found to influence both the magnitude of the acoustic response and the position of the resonance peaks, highlighting the potential of this approach for noise control applications.

Keywords: *Acoustic metamaterials, acoustic black hole (ABH), impedance matching, finite element method (FEM)*

1. Introdução

Na modernidade, máquinas e outras tecnologias, apesar de essenciais para que diversos setores existam, provocam grande desconforto ao gerar poluição sonora. Nessa perspectiva, o impacto negativo do ruído na saúde humana é amplamente documentado, incluindo distúrbios do sono, estresse, perda auditiva e problemas de concentração. Portanto, encontrar maneiras eficazes de controlar o ruído é uma prioridade para melhorar a qualidade de vida nas áreas urbanas e industriais. Contudo, ainda que existam soluções que visam amenizar esse problema, os materiais convencionais não são capazes de oferecer um melhoramento significativo para a atenuação sonora, possuindo certa limitação tanto na eficácia quanto na implementação. Nesse sentido, no final do século passado, novas alternativas começaram a ser objeto de estudo na área da acústica.

Etimologicamente "além da matéria", o termo metamaterial foi primeiramente utilizado por Rodger Walser em 1999, para se referir a estruturas organizadas periodicamente que não existiam na natureza. Originalmente orientados para fins eletromagnéticos, o desenvolvimento dos primeiros metamateriais apresentou teorias de refração negativa, permissividade negativa e permeabilidade negativa, e foram estabelecidos para aplicações ópticas, terahertz e micro-ondas. Considerando as características análogas destes fenômenos, as ondas acústicas também foram objeto de desenvolvimento para o chamado Metamaterial Acústico. À exemplo, os primeiros metamateriais desenvolvidos nessa área foram o índice de refração negativo, manto invisível e manipulação de frente de onda. Ao longo dos últimos anos, a manipulação de ondas acústicas tem sido intensamente investigada. Vários estudos desenvolveram metamateriais passivos (onde a propriedade do material é constante), como a escultura de matriz periódica apresentada em [1], por exemplo. Dito isto, o recente desenvolvimento de metamateriais acústicos representa um novo campo de pesquisa na acústica aplicada ao controle de ruído [2].

Em metamateriais acústicos, as estruturas periodicamente arranjadas, interagem com as ondas sonoras criando efeitos diversos a depender dessas geometrias, permitindo o controle do ruído. Essa interação, pode criar efeitos de interferência destrutiva nas ondas que atravessam essa estrutura, corroborando com atenuação sonora. Outro conceito importante é o de difração sonora, um fenômeno que ocorre quando as ondas sonoras encontram um obstáculo ou uma abertura e a contornam devido à natureza ondulatória do som, espalhando-se em diferentes direções. É importante ressaltar que, a difração está intrinsecamente relacionada à relação entre o comprimento de onda e o obstáculo. Assim, em barreiras acústicas, observa-se que a difração ocorre de maneira mais significativa para faixas mais baixas de frequência [3,4].

Nesse contexto, a aplicação prática dos conceitos e teorias mencionados é fundamental para abordar uma questão premente: a ineficácia das barreiras acústicas em lidar com frequências mais baixas. O desafio reside na capacidade de melhorar a efetividade dessas barreiras, especialmente quando confrontadas com ondas na faixa mencionada, que tradicionalmente desafiam os métodos convencionais. Para superar essa limitação, foi projetado um dispositivo ancorado nos pressupostos teóricos do "*Acoustic Black Hole*" (ABH) ("Buraco Negro Acústico") que representa um avanço significativo na engenharia acústica. Este dispositivo foi projetado para ser integrado no topo das barreiras acústicas existentes, visando mitigar os efeitos da difração em uma frequência específica. Assim, o desenvolvimento deste metamaterial acústico não apenas representa uma solução engenhosa para o desafio da difração em frequências mais baixas, mas também abre portas para novas possibilidades na concepção e aprimoramento de tecnologias acústicas. Ao explorar essa abordagem inovadora, é possível transformar fundamentalmente a maneira como lidamos com o ruído em ambientes urbanos e industriais, contribuindo para um futuro mais tranquilo e sustentável para todos.

Em resposta à tal questão propôs-se um estudo aprofundado sobre o uso de um metamaterial acústico inovador sobre as barreiras acústicas tradicionais. A proposta partiu de um levantamento bibliográfico para compreender os avanços mais recentes na área de metamateriais acústicos. A realização de

simulações computacionais avançadas utilizando métodos numéricos, com o objetivo de modelar o comportamento do metamaterial em diferentes cenários e o estudo de novos modelos de dispositivos, com o intuito de analisar os efeitos resultantes de diferentes interpretações de uma mesma teoria.

2. Revisão da literatura

Os metamateriais são estruturas artificiais racionalmente projetadas com elementos *subwavelength* (subcomprimento de onda) dispostos periodicamente ou não periodicamente, que exibem propriedades incomuns além dos meios naturais. Desde sua descoberta, os metamateriais têm sido amplamente investigados para guiar e controlar o fluxo de ondas eletromagnéticas e acústicas de maneira fundamental. Manipulações inovadoras de ondas, como o índice de refração negativo, a radiação Cherenkov invertida e o efeito Doppler inverso, foram demonstradas experimentalmente. As características dos metamateriais são determinadas em grande parte pelas estruturas periódicas projetadas, em vez das propriedades intrínsecas dos materiais naturais. Como os parâmetros geométricos dos metamateriais podem ser otimizados especificamente, propriedades desejáveis podem ser adquiridas ao alterar a topologia e os tamanhos. Devido à capacidade de controlar interações entre ondas e matéria, os metamateriais têm se mostrado um conceito importante para o desenvolvimento de materiais funcionais [3].

Os metamateriais eletromagnéticos desempenharam o papel principal na realização dos primeiros metamateriais, que utilizaram as permissividades e permeabilidades equivalentes negativas em experimentos e contribuíram para nossa compreensão teórica do campo. Conceitos semelhantes foram usados para transferência de calor, mecânica e óptica, promovendo tanto o surgimento quanto o rápido desenvolvimento dos metamateriais acústicos, em paralelo com pesquisas em cristais fonônicos e metamateriais eletromagnéticos. Por exemplo, em 2006, ressoadores de Helmholtz foram dispostos periodicamente, e foi experimentalmente demonstrado que existe um módulo elástico equivalente negativo na faixa de frequência ressonante. Posteriormente, usando a teoria convencional de cristais fonônicos, vários grupos de pesquisa descobriram uma ampla faixa de frequência de metamateriais acústicos com densidade de massa equivalente e módulo de volume negativos. Em 2018, um painel sanduíche de metamaterial baseado em ressonância local foi apresentado, melhorando significativamente o isolamento sonoro dos painéis sanduíche. Em 2019 foi projetado um cristal fonônico de carbeto de silício poroso unidimensional, intercalado entre duas camadas de borracha. Esses estudos utilizaram um tubo ou cavidade para obter parâmetros equivalentes negativos. Infelizmente, essas estruturas tendem a ser rígidas e sua forma não pode ser facilmente alterada [5].

A maioria dos primeiros metamateriais acústicos possuíam microestruturas periódicas com características específicas de ressonância incorporadas em um material de matriz. As respostas acústicas negativas resultantes são frequentemente limitadas a uma pequena faixa de frequência (próxima à frequência de ressonância) e suas larguras de banda de operação são estreitas. Metamateriais acústicos poderiam ter unidades de ressonância local que podem produzir propriedade acústica especial em uma escala abaixo do comprimento de onda de interesse [6]. Posteriormente, graças aos avanços na pesquisa, o conceito de metamateriais acústicos se expandiu. Foi sugerido que qualquer estrutura acústica artificial que use uma unidade estrutural repetitiva ou aleatória para modificar significativamente os parâmetros acústicos equivalentes dos materiais pode ser chamada de "metamaterial acústico"[7]. Em 2012, foi obtido teoricamente um índice de refração negativa de banda larga para uma estrutura espacial dobrada. Foram também realizados parâmetros duplamente negativos sem usar um mecanismo de ressonância local, o que compensou a largura de banda estreita [8]. Em 2016, pesquisadores estenderam metamateriais acústicos espacialmente dobrados para três dimensões. O grupo introduziu o conceito de metamateriais acústicos tridimensionais de duplo negativo e também verificou experimentalmente as características de banda larga de tais metamateriais [9].

A manipulação de ondas acústicas é vital em campos como geologia oceânica, biologia marinha e engenharia biomédica, desempenhando um papel crucial no cancelamento de ruído, imagens ultrassônicas e em várias outras aplicações. Os metamateriais acústicos, com sua capacidade única de exibir um módulo de volume negativo, desempenham um papel significativo no controle dessas ondas. Esses materiais demonstram um comportamento surpreendente: sob uma força compressiva externa, eles aumentam de volume, uma característica contrária à intuição natural associada a materiais com módulo de volume positivo. Esse fenômeno ocorre em uma faixa de frequência específica próxima à ressonância monopolar. Quando submetidos a um sinal oscilante próximo à frequência de ressonância, a uma velocidade em que o meio não pode responder adequadamente, ocorre um deslocamento de fase. Este deslocamento implica que o sinal de resposta é o oposto do sinal de entrada. Devido a esse atraso de fase, as células unitárias do metamaterial respondem de maneira negativa ao campo de pressão oscilante, resultando em um módulo de volume negativo. Efeitos semelhantes são observados na densidade de massa durante a ressonância dipolar, onde o atraso na resposta faz com que o centro de massa de cada célula unitária desacelere quando empurrado pelo campo de pressão oscilante. Na faixa de frequência em que as ressonâncias monopolar e dipolar se sobrepõem, o metamaterial exibe tanto módulo de volume negativo quanto densidade negativa. Essas propriedades materiais negativas resultam em uma velocidade de fase negativa, levando a um índice de refração negativo, o que implica numa série de efeitos diversos [4].

Dentre as teorias conhecidas acerca de metamateriais acústicos, o conceito do *Acoustic Black Hole* (ABH) se destaca, em especial por ser independente de estruturas ressonantes, apresentando assim boa aplicabilidade em uma ampla faixa de frequência. O ABH surgiu da aplicação dos conceitos do eletromagnetismo à acústica, sendo o análogo acústico do absorvedor omnidirecional de campo eletromagnético, denominado “buraco negro”. Trata-se de um absorvedor sonoro omnidirecional, geralmente cilíndrico, constituído por uma camada metamaterial de casamento de impedância e um núcleo de material absorvedor poroso [10,11].

Para a obtenção deste metamaterial são propostas estruturas cilíndricas nas quais o perfil de velocidade do som é obtido pela variação do módulo volumétrico efetivo, estruturas com metamateriais de parâmetros negativos e dispositivos constituídos por hastes pequenas com fração de preenchimento variável. Para isso, o absorvedor poroso é circundado por uma camada de casamento de impedância gradativo. Para ondas de baixa frequência, as propriedades dessa estrutura podem ser descritas pela teoria de meios efetivos. O casamento e o perfil desejado de velocidade de onda são obtidos pelo emprego de pequenos espalhadores, de módulo volumétrico menor e densidade de massa comparável ao do fluido circundante, de modo que qualquer interferência mecânica adicional causada pelo empuxo possa ser evitada, e cujo raio é muito menor que o comprimento de onda do som, a fim de manter as condições da teoria aplicada. Considerando uma camada cilíndrica de raio externo *R* e raio interno *Rc* imersa em ar, a densidade efetiva varia radialmente segundo a Equação 1 [10,11].

$$\rho(r) = \rho_0 \alpha(r), \tag{1}$$

e o módulo volumétrico efetivo segundo a Equação 2 [10].

$$K(r) = \rho_0 c^2 k(r), \tag{2}$$

em que ρ_0 é a densidade de equilíbrio do ar, *c* é a velocidade adiabática do som no ar e *α(r)* e *k(r)* são as propriedades efetivas normalizadas. Considera-se então uma matriz regular de cilindros rígidos, infinitamente longos, com fração de preenchimento radialmente variável *F(r)*, sob a incidência de uma onda de baixa frequência perpendicular aos eixos dos cilindros. Suas propriedades efetivas normalizadas são descritas pela Equação 3 [10].

$$\alpha(r) = \frac{1 + F(r)}{1 - F(r)}, \qquad k(r) = \frac{1}{1 - F(r)}, \tag{3}$$

Assim, desprezando inicialmente as perdas viscosas e térmicas, as propriedades efetivas do dispositivo dependem da fração de preenchimento, que deve aumentar em direção ao centro do cilindro, conforme descreve a Equação 4 [10].

$$F(r) = \left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1, \tag{4}$$

Portanto, conhecendo-se quaisquer dois parâmetros entre os raios geométricos do dispositivo e o módulo volumétrico do material constituinte, podemos projetar um dispositivo desde que os seguintes requisitos sejam satisfeitos. Primeiro, o módulo volumétrico do núcleo deve ser menor que o do meio hospedeiro, e segundo a densidade de massa do núcleo e dos cilindros nas camadas de revestimento deve ser próxima à do meio hospedeiro. Além do que, considera-se também que, para obter o melhor desempenho, a frequência da onda incidente não pode ultrapassar a faixa na qual o meio efetivo é válido [11].

3. Material e métodos

A metodologia adotada neste trabalho compreendeu o desenvolvimento de um algoritmo de dimensionamento geométrico do metamaterial acústico, a elaboração dos modelos CAD e a realização de simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Inicialmente, foi desenvolvido o modelo padrão do dispositivo, projetado para a frequência de 500 Hz, seguido pela proposição de duas configurações geométricas alternativas. Devido às limitações computacionais, a avaliação numérica foi realizada exclusivamente para o modelo padrão, considerando configurações com cinco e sete camadas. Para reduzir o custo computacional, foi adotada uma configuração baseada em um tubo de impedância, permitindo avaliar a influência do dispositivo sobre a resposta acústica do sistema por meio da comparação com uma configuração de referência sem o dispositivo.

3.1 Algoritmo de dimensionamento do dispositivo

O desenvolvimento do dispositivo foi fundamentado nos princípios de metamateriais acústicos omnidirecionais, considerando a variação radial das propriedades acústicas efetivas por meio da distribuição geométrica dos elementos que compõem a estrutura. Essa abordagem teve como objetivo promover o casamento de impedâncias acústicas entre a estrutura do metamaterial e o núcleo de material absorvente, buscando aproximar o comportamento de uma camada perfeitamente casada (*Perfectly Matched Layer* – PML).

Com base nesses princípios, foi desenvolvido um algoritmo computacional (Código 1) para determinar os parâmetros geométricos necessários ao dimensionamento do metamaterial. O algoritmo utiliza como dados de entrada o raio externo da estrutura, as componentes real e imaginária da impedância acústica do material absorvente e o número de camadas desejado. A partir desses parâmetros, são calculados o raio interno do dispositivo, a posição radial de cada camada, o parâmetro de preenchimento e o raio dos elementos cilíndricos que compõem a estrutura. Os valores obtidos foram utilizados para orientar a construção do modelo CAD do dispositivo, apresentada na seção seguinte.

Código 1: Algoritmo do Metamaterial

```
import math
R = float(input('External Radius:'))
ZpR = float(input('Impedance Real Part: '))
ZpC = float(input('Impedance Complex Part: '))
Rc = (R/math.sqrt(2)) * ((math.sqrt(8* (math.sqrt(((ZpR)**2) + ((ZpC)**2)))**2  ))
/ (math.sqrt(1 + 8 * (math.sqrt(((ZpR)**2) + ((ZpC)**2)))**2 ) - 1))
print(f'Internal Radius: {Rc:.4f} meters\n')

Nlayer = int(input('Number Of Layers: '))
Fl = (R - Rc) / Nlayer # Fraction Length
print('')
for x in range(0, Nlayer, 1):
    r = (Rc + (Fl/2)) + (x*Fl) #Radius Position
    print(f'Radius Position {x + 1}: {r:.4f}m')
    Fr =  ((R / r)**2) - 1 #Filling Fraction
    Ra = Fl * Fl * Fr #Fraction Area
    Rod = math.sqrt(Ra/math.pi) #Rod Radius
    print(f' Rod Radius: {Rod*1000:.4f}mm\n')
```

3.2 Criação do modelo padrão CAD

A partir do algoritmo de projeto do metamaterial, foi desenvolvido o modelo CAD do dispositivo, otimizado para a frequência de 500 Hz. Para o dimensionamento da geometria, foram utilizados valores de impedância acústica característicos de materiais absorventes disponíveis comercialmente, como a lã de rocha. Com base nesses parâmetros, foi estabelecida a configuração geométrica do dispositivo, conforme apresentado na Figura 1.

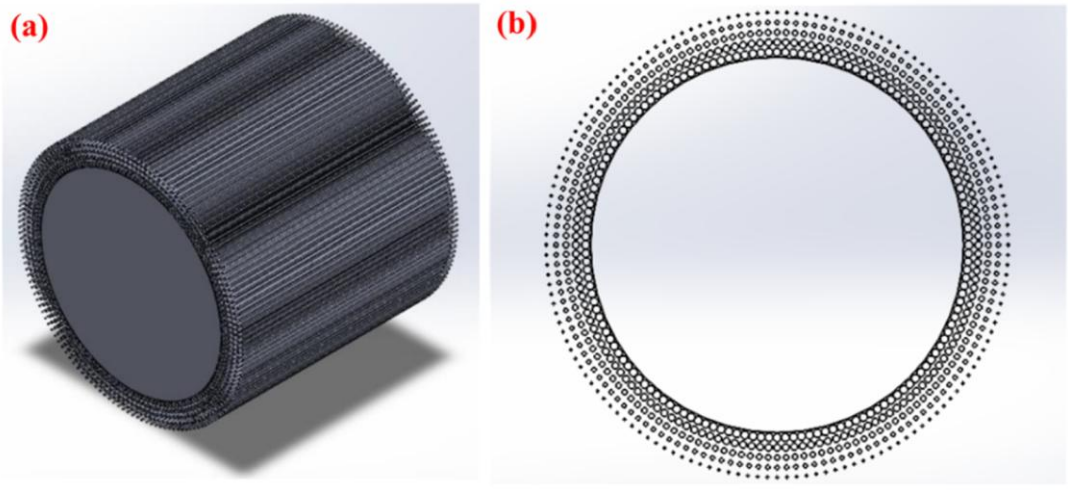


Figura 1: Modelo CAD do dispositivo padrão, projetado para 500 Hz: (a) vista isométrica e (b) vista frontal (axial).

A geometria do modelo padrão consiste em uma série de tubos com diâmetros progressivamente maiores, dispostos em camadas da região externa para a interna, de acordo com os princípios teóricos apresentados anteriormente. Após o desenvolvimento do modelo inicial, foram realizadas otimizações geométricas visando à adequação do dispositivo a uma possível implementação experimental no topo de uma barreira acústica, conforme apresentado nas Figuras 2 e 3.

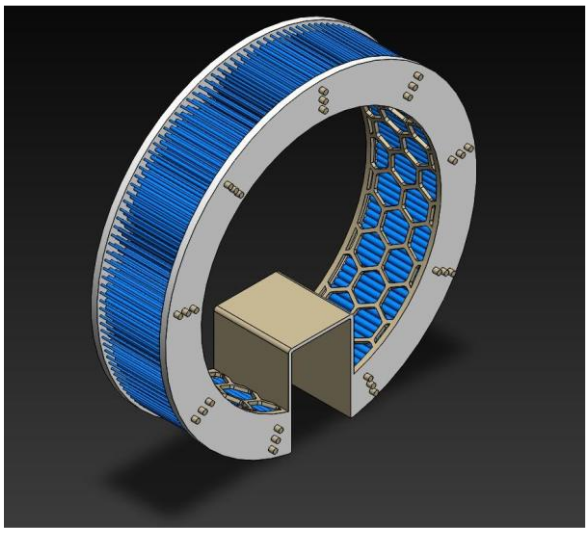


Figura 2: Dispositivo 500 Hz otimizado com acoplamentos

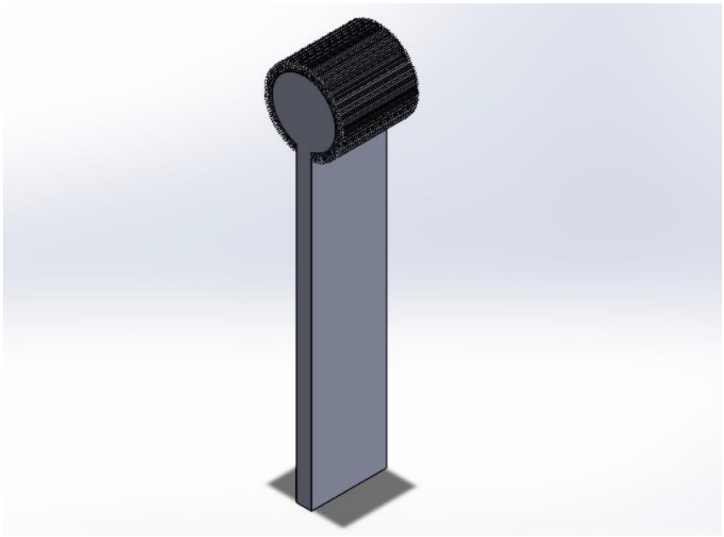


Figura 3: Demonstração do dispositivo no topo de uma barreira acústica

3.3 Variações de modelos do dispositivo

Com o objetivo de explorar diferentes configurações geométricas do dispositivo, foram propostos dois modelos alternativos, desenvolvidos a partir do modelo original, otimizado para a frequência de 500 Hz. O modelo original é constituído por tubos com variação de diâmetro ao longo da direção horizontal. A partir desse princípio, foram elaboradas duas possibilidades de representação dessa variação geométrica: a primeira por meio de anéis, conforme ilustrado na Figura 4(a), e a segunda por meio de elementos radiais denominados “espinhos”, apresentada na Figura 4(b).

Embora as duas configurações tenham sido desenvolvidas geometricamente, não foram realizadas simulações numéricas para avaliar seu comportamento acústico, devido às limitações de capacidade computacional dos recursos disponíveis. Dessa forma, os modelos são apresentados como propostas de configurações alternativas do dispositivo, cuja análise numérica poderá ser desenvolvida em trabalhos futuros, permitindo investigar a influência dessas variações geométricas sobre seu desempenho acústico.

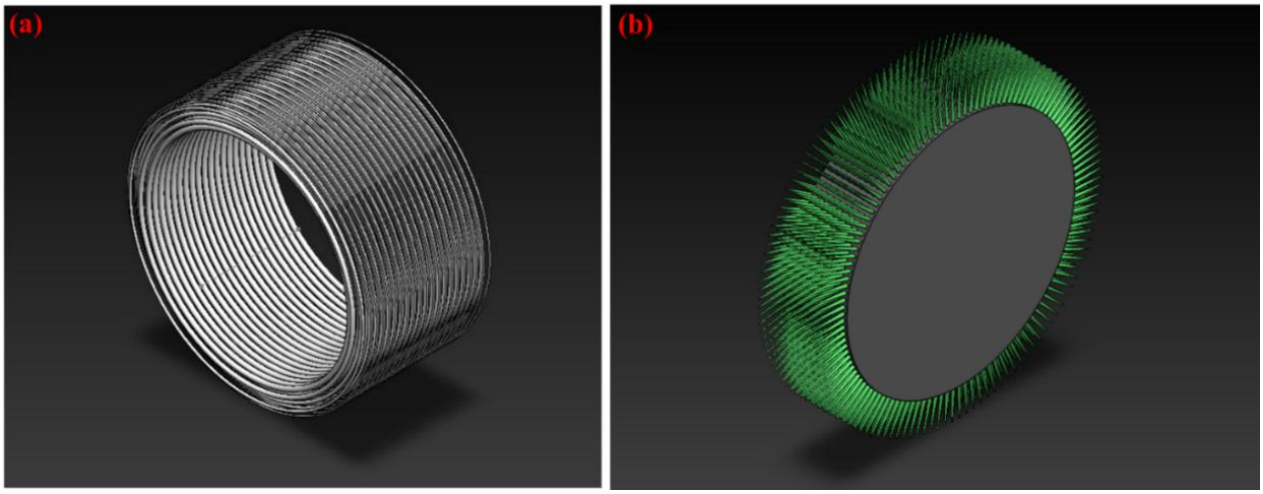


Figura 4: Propostas de variações geométricas do dispositivo: (a) configuração em anéis e (b) configuração com elementos radiais do tipo “espinhos”.

3.4 Simulação do dispositivo num tubo de impedância

Para a avaliação numérica do comportamento acústico do dispositivo, foi adotado o modelo padrão, otimizado para a frequência de 500 Hz, utilizando uma configuração de simulação baseada em um tubo de impedância, na qual o dispositivo foi acoplado à terminação do tubo. Essa abordagem permitiu avaliar a influência da presença do dispositivo sobre a resposta acústica do sistema, por meio da comparação com uma configuração de referência, constituída pelo tubo sem o dispositivo. A escolha dessa metodologia ocorreu após testes e análises de diferentes configurações numéricas, considerando as limitações de *hardware* disponíveis e buscando reduzir o custo computacional das simulações sem comprometer os objetivos do estudo.

A partir do modelo CAD do tubo de impedância, foi estabelecida a configuração numérica apresentada na Figura 5. O tubo foi definido como domínio acústico, enquanto o dispositivo foi definido como domínio físico. Em uma das extremidades do tubo, foi prescrita uma velocidade normal à superfície de 52,65618879 m/s, representando a fonte sonora. Esse valor foi determinado de modo que o produto entre a velocidade e a área da superfície fosse igual à unidade, simplificando os cálculos posteriores. Na superfície de terminação, foi aplicada uma condição de contorno de impedância acústica complexa, visando representar o comportamento de uma parede absorvente. Para essa condição, foram adotados valores de resistência acústica de $6{,}018 \times 10^{-7}$ kg/(mm²·s) e reatância acústica de $-3{,}107 \times 10^{-6}$ kg/(mm²·s). O nível de pressão sonora (NPS) foi obtido em uma superfície de observação posicionada imediatamente após a parede absorvente, permitindo avaliar a resposta acústica do sistema ao longo da faixa de frequências analisada.

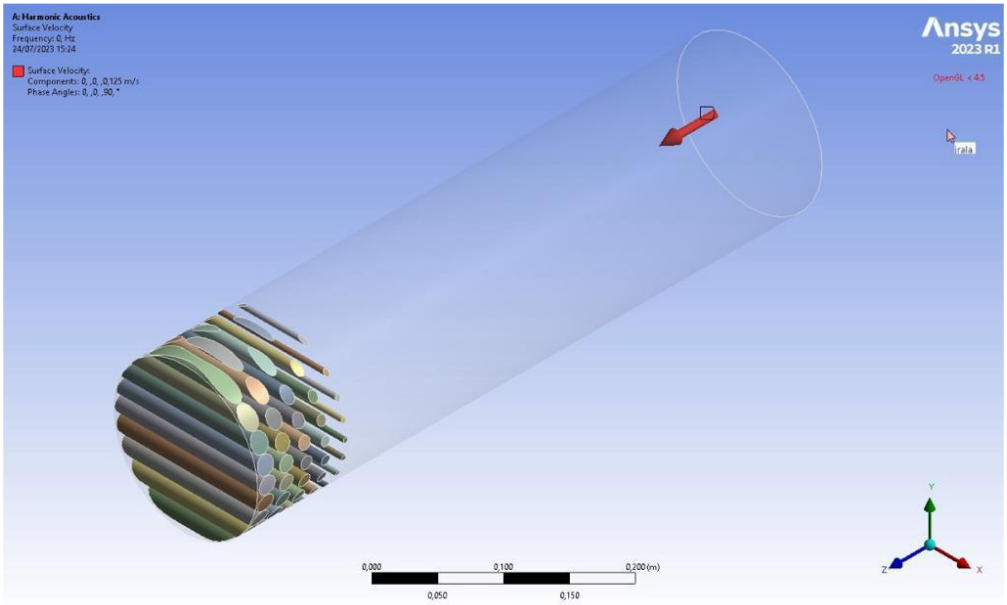


Figura 5: Modelo de simulação do dispositivo no tubo

Para a discretização do modelo numérico pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), foram utilizados elementos tetraédricos com funções de forma quadráticas, cujo dimensionamento seguiu a proporção aproximada de sete elementos por comprimento de onda. A análise numérica foi realizada no domínio da frequência, abrangendo a faixa de 10 a 600 Hz, com incrementos de 10 Hz, visando à obtenção do nível de pressão sonora (NPS) em função da frequência. Foram simuladas três configurações: o tubo sem a presença do dispositivo, utilizado como referência, e o tubo contendo o modelo padrão do dispositivo com cinco e sete camadas. A comparação entre os resultados permitiu avaliar a influência da presença do dispositivo e do número de camadas sobre a resposta acústica do sistema ao longo da faixa de frequências analisada.

4. Resultados e discussões

Após a definição da metodologia empregada nas simulações, os principais resultados obtidos serão apresentados e analisados nas seções seguintes.

4.1 Simulação dos dispositivos no tubo

As simulações numéricas foram realizadas considerando três configurações distintas: o tubo sem a presença do dispositivo, utilizado como referência, e o tubo contendo o modelo padrão do dispositivo com cinco e sete camadas. Os valores de nível de pressão sonora (NPS) foram obtidos na superfície de observação posicionada imediatamente após a parede absorvente. A Figura 6 apresenta a configuração de simulação com o dispositivo de cinco camadas, enquanto a Figura 7 apresenta os resultados do NPS em função da frequência para as três configurações analisadas.

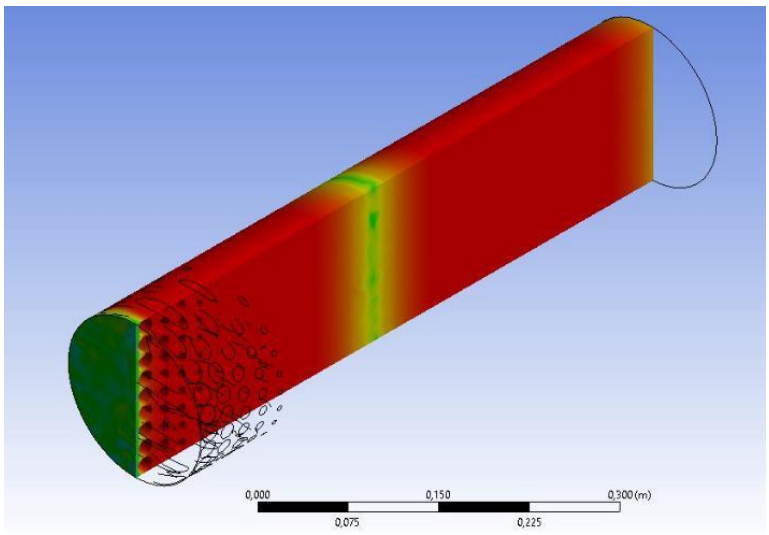


Figura 6: Simulação do dispositivo de 5 camadas no tubo

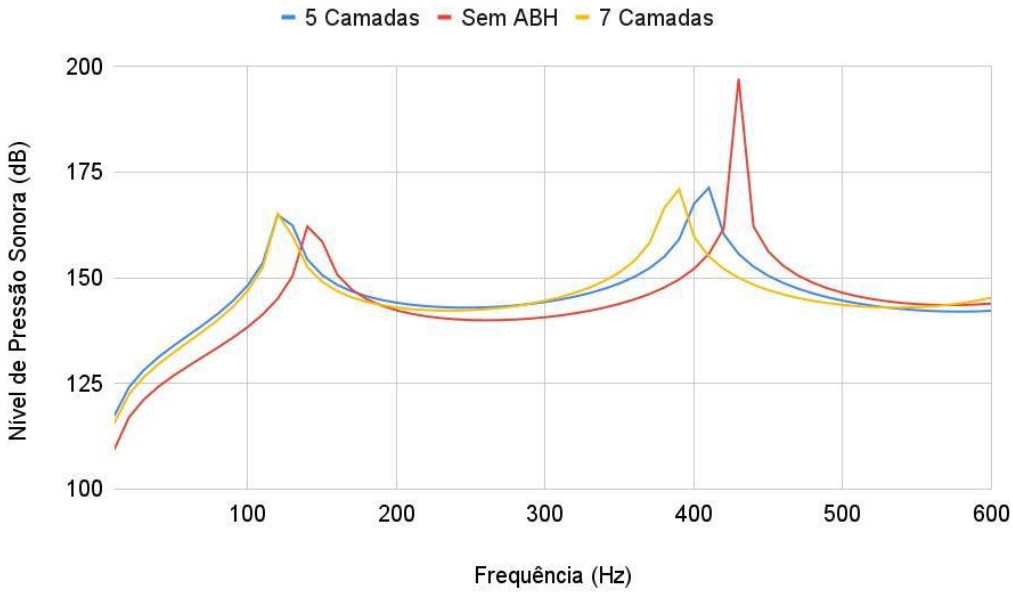


Figura 7: Resultados do nível sonoro x frequência (Sem o dispositivo, 5 camadas e 7 camadas)

A partir dos resultados apresentados na Figura 7, observa-se que a presença do dispositivo modifica significativamente a resposta acústica do sistema, especialmente nas faixas próximas aos picos de ressonância. Na faixa próxima de 430 Hz, correspondente ao maior pico de nível de pressão sonora da configuração sem o dispositivo, verifica-se uma redução expressiva do NPS nas configurações com cinco e sete camadas, sendo a redução mais acentuada para o modelo de sete camadas.

Além da redução do nível de pressão sonora nessa faixa, observa-se um deslocamento dos picos de ressonância para frequências inferiores. Enquanto a configuração sem o dispositivo apresenta seu maior pico próximo de 430 Hz, os modelos com cinco e sete camadas apresentam picos aproximadamente em 410 Hz e 390 Hz, respectivamente. Esse comportamento sugere que a quantidade de camadas influencia não apenas a magnitude da resposta acústica, mas também a posição dos picos de ressonância do sistema. Embora o dispositivo tenha sido projetado para a frequência de 500 Hz, as alterações mais expressivas na resposta acústica foram observadas em frequências inferiores à de projeto. Esse resultado evidencia a necessidade de investigações adicionais para compreender a influência do acoplamento entre o dispositivo e o tubo de impedância sobre a resposta do sistema.

Entretanto, a redução do nível de pressão sonora não ocorre de maneira uniforme ao longo de toda a faixa de frequências analisada. Na faixa de frequências mais baixas, especialmente próxima ao primeiro conjunto de picos, as configurações com o dispositivo apresentam valores de NPS superiores aos da configuração de referência em parte do intervalo. Dessa forma, os resultados indicam que a introdução do dispositivo altera a distribuição da resposta acústica do sistema, com reduções mais expressivas em determinadas faixas de frequência. A comparação entre os modelos de cinco e sete camadas evidencia, ainda, a influência da configuração geométrica sobre o comportamento acústico, indicando a possibilidade de ajustar a resposta do sistema por meio da variação do número de camadas. Ressalta-se que as reduções observadas correspondem às diferenças de nível de pressão sonora obtidas na superfície de observação, não representando uma determinação direta do coeficiente de absorção acústica do dispositivo. Dessa forma, os resultados permitem caracterizar a influência das configurações geométricas sobre a resposta acústica do sistema, enquanto a avaliação quantitativa da absorção demanda análises complementares.

5. Conclusões

O presente trabalho investigou numericamente o comportamento acústico de um dispositivo metamaterial baseado no conceito de *Acoustic Black Hole* (ABH), projetado para promover o casamento de impedâncias acústicas. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo de dimensionamento geométrico e foram realizadas simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), considerando configurações com cinco e sete camadas e uma condição de referência sem o dispositivo.

Os resultados demonstraram que a presença do dispositivo modifica a resposta acústica do sistema, especialmente nas faixas próximas aos picos de ressonância. Foram observadas reduções expressivas do nível de pressão sonora em determinadas frequências, além do deslocamento dos picos de ressonância para frequências inferiores àqueles identificados na configuração de referência. A comparação entre os dispositivos de cinco e sete camadas indicou que o número de camadas influencia a resposta acústica do sistema, evidenciando a possibilidade de ajustar seu comportamento por meio de alterações geométricas.

Entretanto, as reduções observadas não ocorreram de maneira uniforme ao longo da faixa de frequências analisada, indicando a necessidade de investigações adicionais para compreender os mecanismos associados ao comportamento identificado. Além disso, devido às limitações computacionais, as configurações geométricas alternativas propostas não foram submetidas à avaliação numérica.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam o potencial da abordagem investigada para aplicações em controle de ruído, embora sejam necessários estudos complementares para verificar seu desempenho em condições mais próximas das aplicações pretendidas. Como perspectivas futuras, destacam-se a análise das geometrias alternativas, a avaliação direta das propriedades de absorção acústica e a realização de validações experimentais dos dispositivos desenvolvidos.

6. Agradecimentos

Os autores do trabalho são gratos a todos os colaboradores. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Referências

1. GORISHNYY, T.; MALDOVAN, M.; ULLAL, C.; THOMAS, E. Sound ideas. *Physics World*, v. 18, n. 12, dez. 2005. Disponível em: https://physicsworld.com/a/sound-ideas/.
2. IANNACE, G.; CIABURRO, G.; TREMATERRA, A. Metamaterials acoustic barrier. *Applied Acoustics*, v. 181, art. 108172, 2021. ISSN 0003-682X. doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108172. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108172.
3. CHEN, S.; FAN, Y.; FU, Q.; WU, H.; JIN, Y.; ZHENG, J.; ZHANG, F. A review of tunable acoustic metamaterials. *Applied Sciences*, v. 8, n. 9, art. 1480, 2018. ISSN 2076-3417. doi: 10.3390/app8091480. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app8091480.
4. CRAIG, S. R.; SHI, C. Evolution of engineering acoustic waves with metamaterials. *Evolutions in Mechanical Engineering*, v. 1, n. 2, art. EME.000509, 2018. ISSN 2640-9690. doi: 10.31031/EME.2018.01.000509. Disponível em: https://crimsonpublishers.com/eme/pdf/EME.000509.pdf.
5. GAO, N.; ZHANG, Z.; DENG, J.; GUO, X.; CHENG, B.; HOU, H. Acoustic metamaterials for noise reduction: a review. *Advanced Materials Technologies*, v. 7, n. 6, art. 2100698, 2022. doi: 10.1002/admt.202100698. Disponível em: https://doi.org/10.1002/admt.202100698.
6. FOK, L.; AMBATI, M.; ZHANG, X. Acoustic metamaterials. *MRS Bulletin*, v. 33, n. 10, p. 931–934, 2008. doi: 10.1557/mrs2008.202. Disponível em: https://doi.org/10.1557/mrs2008.202.
7. TORRENT, D.; SÁNCHEZ-DEHESA, J. Acoustic cloaking in two dimensions: a feasible approach. *New Journal of Physics*, v. 10, n. 6, art. 063015, 2008. ISSN 1367-2630. doi: 10.1088/1367-2630/10/6/063015. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1367-2630/10/6/063015.
8. LIANG, Z.; LI, J. Extreme acoustic metamaterial by coiling up space. *Physical Review Letters*, v. 108, n. 11, art. 114301, 2012. doi: 10.1103/PhysRevLett.108.114301. Disponível em: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.114301.
9. MAURYA, S. K.; PANDEY, A.; SHUKLA, S.; SAXENA, S. Double negativity in 3D space coiling metamaterials. *Scientific Reports*, v. 6, art. 33683, 2016. doi: 10.1038/srep33683. Disponível em: https://doi.org/10.1038/srep33683.
10. ELLIOTT, A. S.; VENEGAS, R.; GROBY, J.-P.; UMNOVA, O. Omnidirectional acoustic absorber with a porous core and a metamaterial matching layer. *Journal of Applied Physics*, v. 115, n. 20, art. 204902, 2014. doi: 10.1063/1.4876119. Disponível em: https://doi.org/10.1063/1.4876119.
11. ZHENG, L.-Y.; WU, Y.; ZHANG, X.-L.; NI, X.; CHEN, Z.-G.; LU, M.-H.; CHEN, Y.-F. A new type of artificial structure to achieve broadband omnidirectional acoustic absorption. *AIP Advances*, v. 3, n. 10, art. 102122, 2013. doi: 10.1063/1.4826610. Disponível em: https://doi.org/10.1063/1.4826610.