



**1º FÓRUM DE
ACÚSTICA
DA SOBRAC-CO
BRASÍLIA - DF**

Metamateriais Acústicos Ventilados: Uma Revisão sobre Mecanismos de Isolamento Sonoro

Lucas Geofre de Castro Jardim, Marlipe Garcia Fagundes Neto.

UFG

RESUMO: Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte dos metamateriais acústicos aplicados ao isolamento sonoro, com foco em estruturas ventiladas. A pesquisa investiga mecanismos como Ressonadores de Helmholtz, Fabry-Pérot, Rainbow-Trapping e interferência de tipo Fano. Foram analisadas topologias emergentes, como metassilenciadores, metapainéis e metagaiolas, além de inovações em configurabilidade e design reverso por inteligência artificial. Os resultados indicam que essas estruturas superam as limitações de materiais convencionais, permitindo alta atenuação em baixas frequências simultaneamente à passagem de fluxo de ar. Conclui-se que os metamateriais representam uma solução promissora para desafios complexos da engenharia acústica contemporânea

Palavras-chave Metamateriais acústicos; Controle de ruído; Ventilação.

INTRODUÇÃO

A poluição sonora em centros urbanos e industriais exige soluções de isolamento que superem as limitações dos materiais convencionais. Materiais tradicionais, como barreiras de massa e espumas, são frequentemente ineficientes para baixas frequências e impedem a passagem de ar e luz, restringindo a sua aplicação em sistemas ventilados.

Neste cenário, os metamateriais acústicos surgem como uma tecnologia disruptiva. Projetados em escalas subcomprimento de onda, estas estruturas artificiais utilizam arranjos geométricos — como ressonadores e canais labirínticos — para manipular ondas sonoras de forma anômala. Recentemente, o foco tem-se voltado para metamateriais ventilados, que conciliam alta perda de transmissão acústica com a permeabilidade ao fluxo de ar.

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte dos metamateriais acústicos para isolamento sonoro. O objetivo é discutir os mecanismos físicos de atenuação em baixas frequências e analisar configurações emergentes, como sistemas configuráveis e otimizados por inteligência artificial, destacando o seu potencial para a engenharia acústica contemporânea.

METODOLOGIA

Esta pesquisa constitui uma revisão bibliográfica de carácter exploratório e descritivo, focada em metamateriais acústicos ventilados para controlo de ruído. O levantamento documental foi realizado na plataforma Scopus, cobrindo o período de 2018 a 2026, utilizando os descritores: "ventilated", "metamaterial", "acoustic" e "isolation".

A amostra foi selecionada a partir de periódicos de alto impacto, aplicando-se critérios de inclusão baseados na presença de estruturas subcomprimento de onda, capacidade de fluxo de ar e aplicabilidade na engenharia. Os dados foram categorizados qualitativamente segundo as topologias identificadas (metassilenciadores, metapainéis e metagaiolas) e os seus mecanismos físicos de atenuação, permitindo uma análise comparativa das inovações tecnológicas recentes.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

São denominados Metassilenciadores (metamufflers) os metamateriais acústicos projetados para o controle de ruído unidimensional em sistemas de dutos, substituindo seções da tubulação para reduzir o ruído de fluxo enquanto garantem ventilação e dissipação de calor. Segundo a revisão sistemática de Ang et al. (2023), esses dispositivos operam por meio de quatro mecanismos principais:

1. Ressonadores de Helmholtz (HR)

Este mecanismo fundamenta-se no uso de cavidades microperfuradas para alcançar absorção sonora, sendo tradicionalmente eficaz em frequências mais altas. Para ampliar a atuação para bandas largas e frequências baixas, as pesquisas destacam:

- **Arranjos Sequenciais:** A utilização de múltiplos ressonadores com cavidades de tamanhos variados ou comprimentos de pescoço distintos, como proposto por Gao et al. (2022) e Nguyen et al. (2020), permite que diferentes ressonâncias cubram uma faixa maior do espectro sonoro.
- **Sintonização Ativa e Configurabilidade:** Estudos recentes, como o de Wen et al. (2023), introduzem o uso de estruturas baseadas em origami controladas por pressão de ar para ajustar o volume da cavidade. Adicionalmente, Xiang et al. (2021) demonstraram mecanismos deslizantes manuais que permitem sintonizar a absorção conforme a assinatura do ruído.

O estudo desenvolvido por Chen et al. (2024) propõe uma câmara de metamaterial acústico configurável composta por ressonadores de Helmholtz de formato hexagonal com fendas laterais, fabricados via impressão 3D. O grande diferencial desta tecnologia é a sua configurabilidade e modularidade, permitida por suportes de rotação em cada célula unitária e uma base com furos periódicos; isso possibilita que os ressonadores sejam rotacionados ou reorganizados manualmente para ajustar o desempenho acústico e otimizar a ventilação conforme a necessidade, sem a necessidade de projetar ou imprimir uma nova estrutura.

2. Ressonadores de Fabry-Pérot

Conhecidos como ressonadores de "espaço enrolado" (*space-coiling*), eles superam a limitação espacial dos ressonadores de Helmholtz tradicionais ao dobrar canais estreitos dentro de um design compacto. Esse prolongamento do caminho percorrido pelo som facilita a dissipação de energia em baixas frequências. Prototipagens realizadas por Shao et al. (2021) e Wang e Mao (2021) comprovaram absorções superiores a 80% em frequências abaixo de 400 Hz utilizando este conceito.

3. Ressonadores de Rainbow-Trapping (Armadilha de Arco-íris)

Este mecanismo utiliza matrizes de estruturas de gradiente para dispersar e "aprisionar" diferentes comprimentos de onda, resultando em uma absorção de banda larga altamente eficiente. O grupo de pesquisa de Fusaro et al. (2020, 2021, 2022) e o trabalho de Yang et al. (2018) exploraram designs em formato de "telha" onde o som é forçado a passar por aberturas

laterais entre cavidades de gradiente, reduzindo a transmissão sonora em faixas que variam de 0,5 a 5 kHz.

4. Interferência tipo Fano (Fano-like)

Diferente dos conceitos de ressonância pura, a interferência tipo fano exige dois caminhos de propagação: um para a transmissão direta (onda não espalhada) e outro para o espalhamento via ressonância local. De acordo com Ang et al. (2023), a interação entre essas ondas na saída do metamuffler gera uma interferência destrutiva, o que permite eliminar ruídos específicos mantendo uma abertura considerável para a passagem de ar.

O artigo de Zhang et al. (2024) apresenta um metamaterial acústico de cavidade multigradiente (MCAM). O mecanismo de funcionamento baseia-se no acoplamento entre a ressonância de Fano acústica. O grande diferencial desta pesquisa é a implementação de um Método de Design Reverso Modular (MRDM), que utiliza uma rede neural profunda (DNN) controlada por um algoritmo de enxame de partículas (PSO) para otimizar a geometria. Essa abordagem inovadora alcança uma eficiência computacional 495 vezes superior ao método de elementos finitos tradicional, permitindo criar um dispositivo que mantém mais de 25% de ventilação enquanto oferece uma redução sonora de banda larga de 38 dB na faixa de 500 a 2000 Hz.

O artigo de Xu et al. (2024) propõe um metamaterial helicoidal ultra-aberto voltado para o isolamento sonoro de alta performance em sistemas que exigem fluxo de ar. O mecanismo central baseia-se no conceito de múltiplas ressonâncias de tipo Fano acústicas consecutivas, que opera através da superposição para promover uma interferência destrutiva entre um canal central aberto e canais helicoidais. O principal diferencial dessa estrutura é a superação da natureza de banda estreita das ressonâncias de Fano convencionais, alcançando uma largura de banda de atenuação sonora sem precedentes de 80% (na faixa de 770 a 1768 Hz) e mantendo, simultaneamente, uma eficiência de ventilação superior a 90%.

5. Metapainéis (Metapanel) e Metagaiolas (Metacages).

Os Meta silenciadores são limitados para transmissão sonora unidimensional, no entanto, podem ser interpretados como blocos que podem compor uma estrutura bidimensional capaz de isolar acusticamente determinadas frequências sonoras, ao mesmo tempo que permite a passagem de ar. Essas estruturas são denominadas por Metapainéis. Um exemplo de metapainel é o estudo de Kumar, Xiang e Lee (2020) que apresenta um metamaterial acústico ventilado projetado para janelas, composto por células unitárias que integram uma abertura central para ventilação e uma câmara de Helmholtz com pescoços perfurados. O grande diferencial desta tecnologia é o equilíbrio entre o alto desempenho acústico (absorção superior a 0,96 e perda de transmissão de 18 dB em 1000 Hz) e uma eficiência de ventilação de 45%, somado a uma inovadora técnica de montagem modular estilo "quebra-cabeça", que facilita a fabricação de painéis de larga escala de forma configurável e sem a necessidade de adesivos.

Seguindo o mesmo princípio dos Metapainéis, as Metagaiolas objetivam o isolamento sonoro pela associação de Metassilenciadores. Contudo o silenciamento ocorre por meio de uma estrutura que cerca a fonte sonora. Desse modo, o que convencionalmente exigia um

enclausuramento da fonte, com o uso de Metagaiolas, agora pode ser feito com uma estrutura que permite a troca de fluidos do meio interno com o meio externo. Um modelo desse conceito é o estudo desenvolvido por Krasikova et al. (2022) propõe a Metahouse, uma câmara de isolamento sonoro fundamentada em um metamaterial acústico ventilado de estrutura periódica, composto por arranjos de ressonadores de Helmholtz acoplados com geometria em formato de "C". O mecanismo central de operação consiste na criação de múltiplas bandas proibidas (*stop-bands*) de banda larga, decorrentes do forte acoplamento local entre os pares de ressonadores de helmholtz capazes de bloquear a transmissão sonora. O grande diferencial dessa tecnologia reside no alcance de uma atenuação sonora significativa (média de -18,6 dB) em uma faixa espectral excepcionalmente ampla (1500 a 16500 Hz), preservando a ventilação e a transparência óptica parcial através de uma configuração esparsa, o que permite sua aplicação prática em espaços urbanos para a criação de zonas de silêncio.

CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica permitiu concluir que os metamateriais acústicos ventilados rompem o paradigma tradicional do isolamento sonoro, que historicamente exigia barreiras maciças e impeditivas ao fluxo de ar. Através da manipulação geométrica em escala subcomprimento de onda, foi demonstrado que é possível alcançar altos índices de perda de transmissão, especialmente em baixas frequências, mantendo taxas de ventilação superiores a 90% em alguns casos.

As tecnologias discutidas, como a Metahouse e as câmaras configuráveis via impressão 3D, evidenciam uma tendência de modularidade e adaptabilidade. Além disso, a integração de métodos de design reverso assistidos por redes neurais aponta para uma redução drástica no tempo de projeto e otimização de performance. Em suma, os metamateriais acústicos não apenas oferecem uma alternativa eficiente aos materiais porosos e barreiras de massa, mas abrem caminho para aplicações inovadoras em infraestrutura urbana, sistemas de ventilação industrial e arquitetura sustentável, consolidando-se como uma ferramenta indispensável para o futuro do controle de ruído.

REFERÊNCIAS

ANG, L. Y. L.; CUI, F.; LIM, K.-M.; LEE, H. P. A Systematic Review of Emerging Ventilated Acoustic Metamaterials for Noise Control.

XU, Zi-xiang et al. Broadband ventilated sound insulation based on acoustic consecutive multiple Fano resonances. **Physical Review Applied**, v. 21, n. 4, p. 044049, abr. 2024.

CHEN, Zhenyu et al. Reconfigurable 3D printed acoustic metamaterial chamber for sound insulation. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 266, 108978, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.108978>.



Iº FÓRUM DE
ACÚSTICA
DA SOBRAC-CO
BRASÍLIA - DF

ZHANG, Xinhao et al. Modular reverse design of acoustic metamaterial and sound barrier engineering applications: High ventilation and broadband sound insulation. Thin-Walled Structures, v. 196, 111498, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111498>.

KRASIKOVA, Mariia et al. Metahouse: Noise-insulating chamber based on periodic structures. **Advanced Materials Technologies**, v. 8, n. 1, 2200711, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/admt.202200711>.