

Avaliação de Metamateriais Ressonantes para Controle Vibroacústico de Placa Plana em Câmara Acústica

Bruno Giuliani Gomes¹, Maria Alzira de Araújo Nunes², Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira³.

RESUMO: Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de metamateriais ressonantes aplicados ao controle vibroacústico de uma placa plana acoplada a uma câmara acústica. O estudo analisou diferentes geometrias de ressonadores, baseadas no princípio dos atenuadores dinâmicos e nos efeitos de antirressonância como critério de projeto. Três configurações foram investigadas para atuar próximo ao primeiro modo estrutural, cerca de 130 Hz. Resultados experimentais mostraram atenuação nessa faixa e uma região adicional por volta de 300 Hz, além de novos picos adjacentes, típicos de sistemas passivos, indicando potencial para controle acústico em bandas estreitas com bons resultados experimentais consistentes e reproduzíveis.

Palavras-chave: Metamateriais, Controle Vibroacústico, Placa Plana, Câmara Acústica.

INTRODUÇÃO

O controle vibroacústico de estruturas tem recebido atenção crescente em aplicações de engenharia, especialmente em situações nas quais a redução de vibrações e ruído é essencial para o desempenho, conforto e integridade estrutural. Nesse contexto, os metamateriais ressonantes destacam-se como uma alternativa promissora, uma vez que permitem manipular a propagação de ondas mecânicas e acústicas por meio da incorporação de elementos ressonadores projetados para atuar em faixas específicas de frequência (Dalela; Balaji; Jena, 2022). Em placas planas acopladas a cavidades acústicas, o uso dessas arquiteturas torna-se particularmente relevante, pois possibilita investigar a interação entre resposta estrutural e resposta sonora em sistemas vibroacústicos acoplados.

Este trabalho aborda o desenvolvimento de metamateriais ressonantes aplicados ao controle vibroacústico de uma placa plana inserida em uma câmara acústica, buscando compreender como diferentes configurações geométricas de ressonadores influenciam o comportamento dinâmico e acústico do sistema. Para isso, são explorados conceitos associados ao projeto dessas geometrias, considerando sua relação com os mecanismos de atenuação de vibrações e ruído, bem como sua capacidade de modificar a resposta do conjunto placa-cavidade. Assim, o estudo tem como objetivo principal avaliar comparativamente o efeito de diferentes geometrias de ressonadores sobre a resposta vibroacústica do sistema placa-cavidade, estabelecendo uma base para o aprimoramento dessas soluções.

METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho parte do conceito dos atenuadores dinâmicos de vibração, nos quais um sistema ressonante secundário é acoplado à estrutura principal para modificar sua resposta sob excitação harmônica. A relação apresentada na Equação 1 descreve essa resposta em função da frequência, mostrando como os parâmetros do ressonador influenciam a amplitude vibratória da estrutura principal (Inman, 2013)

¹ Universidade de Brasília - Engenheiro Aeroespacial

² FCTE Universidade de Brasília - Professora

³ EESC Universidade de São Paulo - Professor

$$\frac{Xk_p}{F_0} = \frac{1 - \omega^2/\omega_a^2}{\left[1 + \mu(\beta)^2 - (\omega/\omega_p)^2\right] \left[1 - (\omega/\omega_a)^2\right] - \mu(\beta)^2}, \quad (1)$$

onde a resposta normalizada do sistema ($\frac{Xk_p}{F_0}$), ao longo das frequências (ω) com adição dos ressonadores está relacionada com a razão de massas (m) e frequências entre os absorvedores e a placa (subscritos a, p) descritos pelas variáveis μ e β conforme Equação 2:

$$\mu = \frac{m_a}{m_p}, \beta = \frac{\omega_a}{\omega_p}. \quad (2)$$

Um ponto central dessa formulação é a ocorrência de antirressonância, associada à condição em que a resposta da estrutura principal é fortemente reduzida. Nessa situação, a energia vibratória é transferida para o ressonador acoplado, produzindo uma faixa de atenuação dinâmica. Esse comportamento constitui a base física de atuação dos atenuadores de vibração e, conseqüentemente, dos metamateriais ressonantes.

Com base nesse princípio, o desenvolvimento dos metamateriais propostos foi orientado pela exploração dos efeitos de antirressonância previstos pela relação analítica. Assim, as diferentes geometrias de ressonadores foram concebidas de modo a controlar sua sintonia dinâmica e sua interação com a placa plana, utilizando esses efeitos como critério central de projeto para a obtenção de desempenho vibroacústico adequado.

Para a realização dos testes experimentais, foi utilizada uma montagem composta por uma placa plana acoplada a uma câmara acústica, conforme apresentado na Figura 2. As principais propriedades e características do arranjo experimental estão resumidas na Tabela 1.

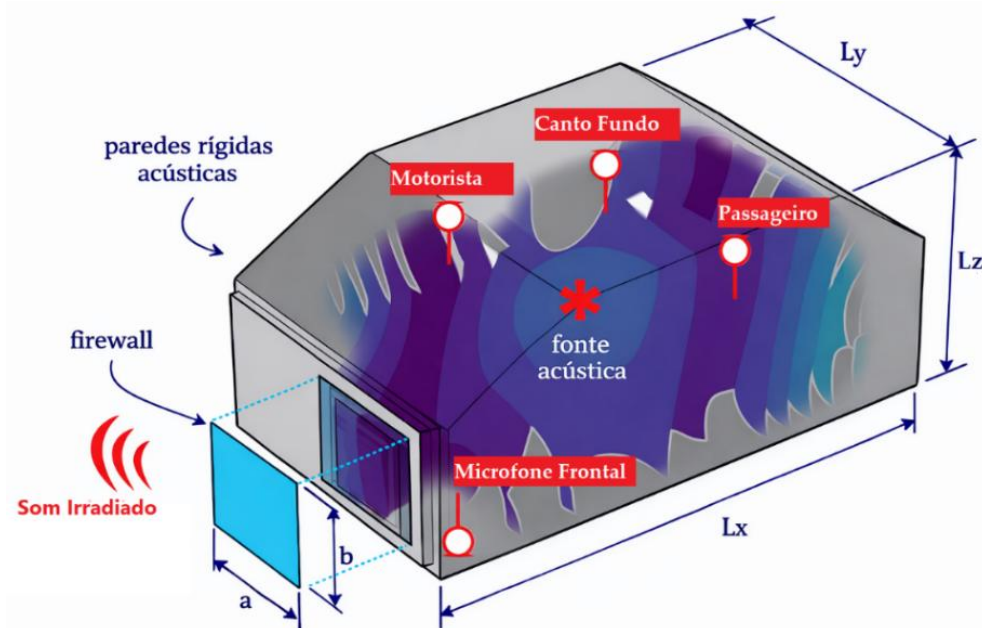


Figura 2: Câmara Acústica (Simulacro Veicular). Adaptado (Konda et al., 2025)

Tabela 1: Parâmetros da Câmara Acústica

Propriedades da Placa	
Material	Alumínio
Módulo de Elasticidade (E)	68,9 GPa
Densidade	2710 kg/m ³
Dimensões da Câmara	
(Lx,Ly,Lz)	(1346, 735, 590) mm
(a,b,t)	(345, 270,1) mm

A Figura 3 apresenta um esquemático da montagem experimental e da instrumentação empregada na câmara acústica para a aquisição dos dados.

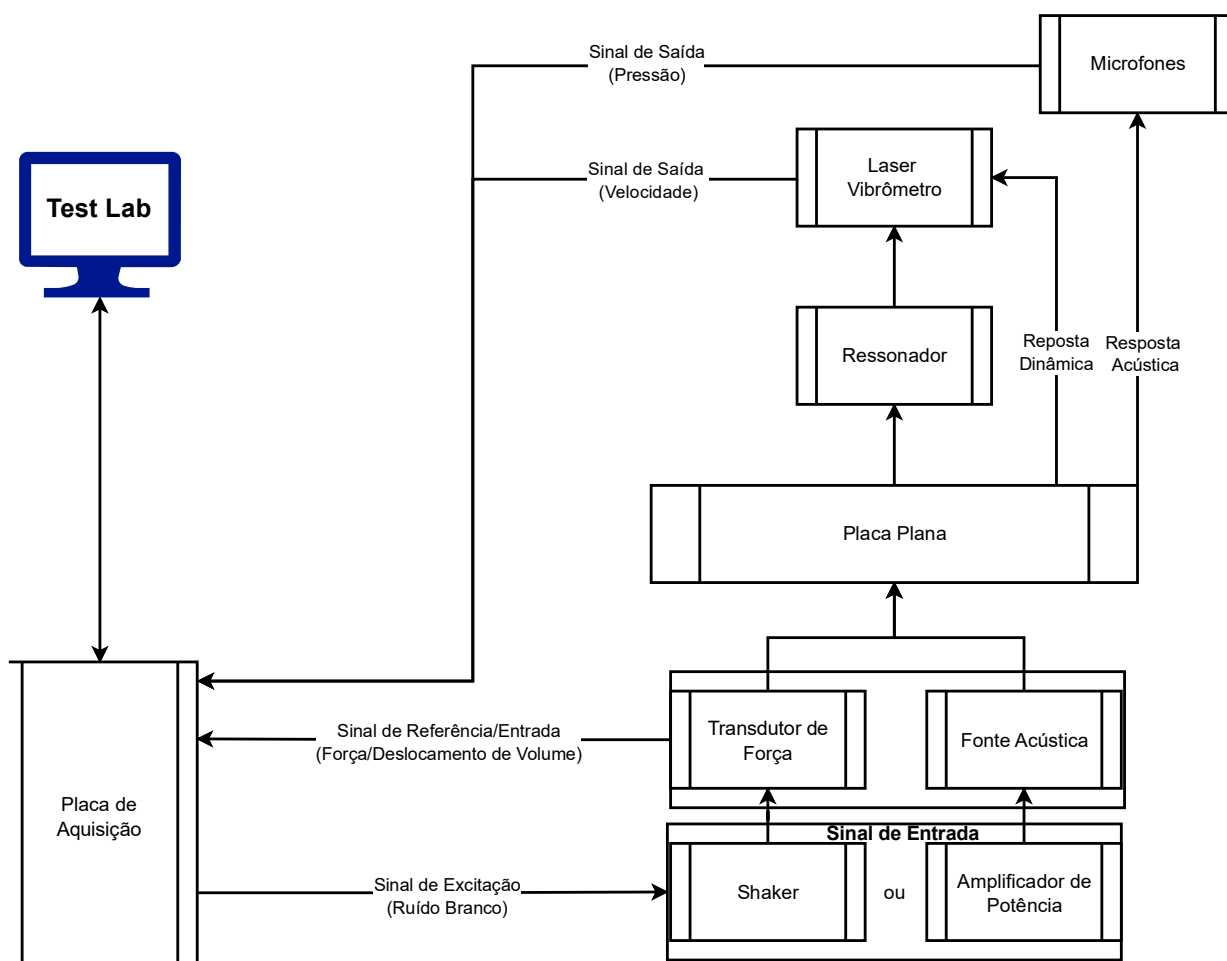


Figura 3: Esquemático da Montagem Experimental

Neste trabalho, foram avaliadas três configurações distintas de ressonadores, conforme apresentado na Figura 4. Os modelos de metamateriais foram projetados de modo a apresentar frequências de ressonância próximas e compatíveis com a frequência natural associada ao primeiro modo estrutural da placa, situada em torno de 130 Hz. Como particularidade, o modelo R2GDL foi desenvolvido de forma a incorporar, adicionalmente, uma segunda frequência de ressonância, localizada nas proximidades de 190 Hz.

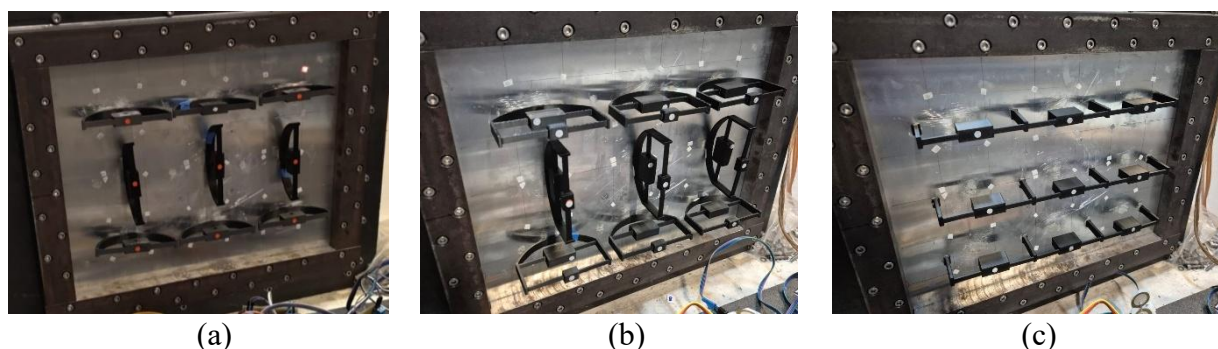


Figura 4: Configurações de Metamateriais Testadas: (a) Modelo de 1 Grau de Liberdade (R1GDL) (b) Modelo de 2 Graus de Liberdade (R2GDL) (c) Modelo de 3 Graus de Liberdade (R3GDL)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Função de Resposta em Frequência (FRF) da resposta acústica interna da câmara, obtida a partir das medições em um dos microfones, é apresentada na Figura 5. Nessa resposta, destacam-se duas regiões principais de interesse. A primeira, em torno de 130 Hz, corresponde à faixa de frequência priorizada no projeto dos ressonadores, na qual se observa uma atenuação clara na ordem de até 50 dB do primeiro pico acústico em decorrência da atuação dos metamateriais.

Além dessa região, identifica-se uma segunda faixa de atenuação, situada nas proximidades de 300 Hz, não prevista inicialmente em projeto, mas associada a um efeito semelhante de redução da resposta acústica promovido pela inserção dos ressonadores. Esse resultado indica que a interação dinâmica entre os metamateriais e o sistema vibroacústico pode produzir efeitos adicionais de controle além da faixa originalmente visada.

Em ambos os casos, observa-se também o surgimento de novos picos de resposta nas regiões adjacentes às bandas atenuadas, tanto antes quanto depois das frequências de maior redução. Esse comportamento é compatível com a atuação de atenuadores passivos, nos quais a introdução de efeitos de antiressonância e redistribuição modal tende a reduzir a resposta em determinadas frequências ao mesmo tempo em que modifica a vizinhança espectral do sistema.



Microfone Frontal

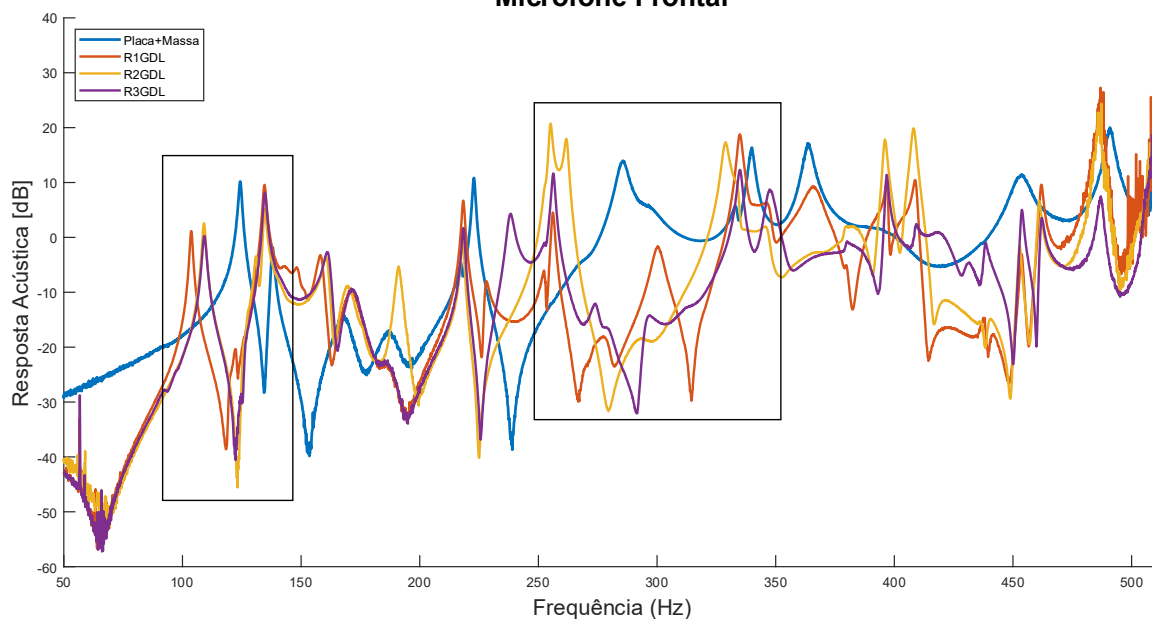


Figura 5: Comparação da Resposta Vibroacústica Obtida (Ref. dB N/m³).

CONCLUSÕES

Os resultados indicam que os metamateriais desenvolvidos são eficazes na atenuação de ruído em frequências específicas, com atuação mais pronunciada em bandas estreitas. Entretanto, essa redução é acompanhada pelo surgimento de novos picos nas proximidades da faixa atenuada, o que restringe sua aplicação em problemas de controle acústico em banda larga. Para a resposta acústica interna da câmara, os três modelos de metamateriais apresentaram desempenho semelhante. Ainda assim, tais estruturas mostram-se promissoras para aplicações de mitigação de respostas acústicas pontuais e previamente identificadas.

REFERÊNCIAS

DALELA, Srajan; BALAJI, P. S.; JENA, D. P. A review on application of mechanical metamaterials for vibration control. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, v. 29, n. 22, p. 3237–3262, 2022.

INMAN, Daniel J. *Engineering vibration*. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.

KONDA, Gabriel et al. Automatic inductance tuning of smart metamaterial for vibro-acoustic applications. In: DINAME 2025, 2025, Águas de Lindóia, SP, Brasil. Anais [...]. Rio de Janeiro: ABCM, 2025.