

MODELAGEM DE UM METAMATERIAL ACÚSTICO COM CÂMARA DE EXPANSÃO USANDO O MÉTODO DA EXPANSÃO DE ONDAS PLANAS (PWE)

L. S. Oliveira, l261283@dac.unicamp.br¹
V. G. R. C. Dos Santos, v228253@dac.unicamp.br¹
E. J. P. Miranda Jr., edson.jansen@ifma.edu.br^{1,2}
J. M. C. Dos Santos, zema@unicamp.br¹

¹Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Departamento de Mecânica Computacional

²Instituto Federal do Maranhão - IFMA

Resumo: Silenciadores são amplamente utilizados para atenuar ruídos em sistemas de dutos, dentre eles, os ressonadores de Helmholtz e a câmara de expansão são amplamente estudados, pois apresentam bom desempenho e custo acessível. Entretanto, para o controle de ruídos em baixas frequências, é necessário um grande volume no ressonador o que inviabilizaria sua aplicação na indústria. Ademais, os materiais tradicionais apresentam controle muito limitado das ondas sonoras. Assim, novos compósitos artificiais com excelente absorção sonora são urgentemente necessários para resolver esse problema. Materiais compósitos feitos pelo homem, como cristais fonônicos e os metamateriais, podem alcançar um controle bastante flexível das ondas mecânicas. O desenvolvimento dos metamateriais têm motivado novas soluções para a atenuação e o controle de ruído em sistemas acústicos. O objetivo desse artigo é utilizar abordagens analíticas e numéricas para o projeto de um metamaterial eficaz usando um dispositivo acústico duto-câmara de expansão periódico, modelado pelo método de expansão em ondas planas (Plane Wave Expansion – PWE). O PWE apresenta resultados semelhantes aos dos métodos numéricos baseados em elementos finitos, mas com um custo computacional consideravelmente menor, indicando assim sua vantagem para uso em problemas de otimização. Exemplos simulados de metamateriais duto-câmara de expansão são realizados e os resultados são comparados com os obtidos pelo método da matriz de transferência (Transfer Matrix Method – TMM) e sua eficiência para atenuar o som é avaliada.

Palavras-chave: câmara de expansão, metamaterial, acústica, PWE, TMM.

1. INTRODUÇÃO

A atenuação do som em sistemas de dutos torna-se cada vez mais indispensável, uma vez que a exposição aos ruídos possui um grande impacto no conforto, saúde e produtividade das pessoas e, a longo prazo, trazem impactos negativos do ponto de vista fisiológico e, principalmente, psicológicos das pessoas (Wu *et al.*, 2019).

Para contornar esse problema, silenciadores são amplamente utilizados para atenuar ruídos em sistemas de dutos, seja em veículos, máquinas, ventilações de ar condicionado, entre outros (Cai e Mak (2018); Gerges *et al.* (2005)). Silenciadores como ressonador de Helmholtz e câmara de expansão são amplamente estudados, pois apresentam bom desempenho e custo acessível, podendo ainda ajustar a faixa de frequência que o ressonador controla apenas alterando sua geometria (Wu *et al.*, 2019).

Porém, para o controle de ruídos em baixas frequências, é necessário um grande volume no ressonador o que inviabilizaria sua aplicação na indústria (Selamet e Lee, 2003). No entanto, metamateriais podem ser empregados na construção de ressonadores, possibilitando a criação de novas soluções para atenuação de ruído em sistemas acústicos (Deery *et al.*, 2022). Metamateriais acústicos têm sido amplamente estudados nas últimas décadas devido a suas características especiais que não são encontradas na natureza, por exemplo, o controle bastante flexível das ondas mecânicas (Miranda Jr. *et al.* (2022); Guan *et al.* (2015)).

Além disso, a utilização de ressonadores distribuídos de forma periódica ou não periódica ao longo de sistemas acústicos apresentam bandas proibidas, comumente conhecidas por bandgaps, que são bandas de frequência onde as ondas mecânicas (elásticas ou acústicas) não se propagam (Campos (2018); Nobrega *et al.* (2016)), sendo de grande interesse para a área de controle de ruído e vibração (Goto e Dos Santos (2019); Assis *et al.* (2019); Xiao *et al.* (2012)).

O desenvolvimento dos metamateriais possibilita a criação de novas soluções para atenuar e controlar os ruídos em sistemas acústicos. Para estudar esses efeitos, utiliza-se dos diagramas de dispersão, que relacionam a frequência f e o

número de onda k (frequência espacial). Estes diagramas podem ser obtidos por diversos métodos, dentre eles o método de expansão de ondas planas (Plane Wave Expansion - PWE). Os diagramas exibem o comportamento evanescente ou propagante dos diferentes modos de onda (Goto *et al.* (2020); Miranda Jr e Dos Santos (2019); Rosa *et al.* (2017)).

O objetivo deste trabalho é utilizar o método de expansão de ondas planas (PWE) para obtenção dos diagramas de dispersão em dutos acústicos utilizando câmara de expansão dispostos periodicamente. Inicialmente as equações usando o método de expansão de ondas planas e o método de matriz de transferência (Transfer Matrix Method - TMM) são apresentadas. Em seguida, o duto acústico é modelado e a validação numérica é realizada por meio do TMM. Após a validação, análises dos parâmetros geométricos da câmara de expansão são estudadas a fim de entender como essa mudança afeta o controle de ruídos.

2. MÉTODO DA EXPANSÃO DE ONDAS PLANAS

A Figura 1 ilustra um sistema acústico de câmaras de expansão periódicas enfatizando uma célula unitária (tracejado em vermelho), a qual é composta de três partes: dois dutos nas extremidades de comprimento L_b e diâmetro D_b , e uma câmara de expansão com comprimento L_a e diâmetro D_a .

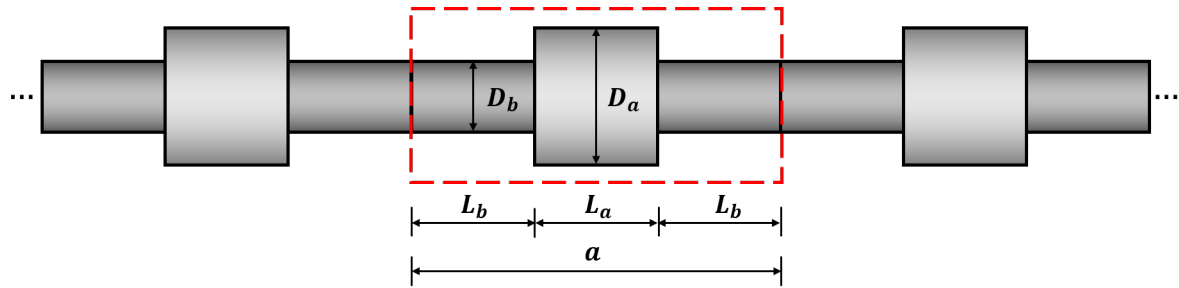


Figura 1: Sistema acústico de câmaras de expansão periódicas. Célula unitária (tracejado em vermelho)

A equação da onda que descreve o comportamento da pressão em um duto acústico com variação de área transversal é dada por (Blauert e Xiang, 2009):

$$B \frac{\partial}{\partial x} \left[A(x) \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \right] = \rho A(x) \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

onde $B = \rho c^2$ é o módulo de compressibilidade, ρ é a densidade do fluido, $A(x)$ é a área da seção transversal do duto, c é a velocidade do som no fluido e $p(x, t)$ é a pressão acústica. Aplicando a transformada de Fourier temporal na Eq. (1), tem-se:

$$B \frac{\partial}{\partial x} \left[A(x) \frac{\partial \hat{p}(x, \omega)}{\partial x} \right] + \rho A(x) \omega^2 \hat{p}(x, \omega) = 0. \quad (2)$$

Aplicando o teorema de Bloch-Floquet, omitindo-se a dependência de ω e considerando a propagação de ondas em uma dimensão

$$\hat{p}(x) = \tilde{p}(x) e^{jkx}, \quad (3)$$

com amplitude de onda de Bloch $\tilde{p}(x)$ periódica, $\tilde{p}(x + a) = \tilde{p}$, sendo $a = L_a + 2L_b$ o comprimento da célula unitária. Expandindo a amplitude de Bloch $\tilde{p}$ em série de Fourier no espaço recíproco tem-se:

$$\tilde{p}(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} p_m e^{jg_m x}, \quad (4)$$

onde $g_m = 2\pi m/a$, p_m é o coeficiente da série de Fourier e $j = \sqrt{-1}$ o número imaginário. Substituindo a Eq. (4) na Eq. (3) obtém-se:

$$\hat{p}(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} p_m e^{jg_m x} e^{jkx} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} p_m e^{j(k+g_m)x}, \quad (5)$$

Assumindo que a variação da área da seção transversal do duto é periódica, $A(x) = A(x + a)$, pode-se expandi-la em série de Fourier como:

$$A(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{jg_n x}, \quad (6)$$

onde $g_n = 2\pi n/a$ e o coeficiente A_n pode ser calculado por:

$$A_n = \frac{1}{a} \int_{-a/2}^{a/2} A(x) e^{-j g_n x} dx. \quad (7)$$

Substituindo as Eqs. (5) e (6) na Eq. (2) e reorganizando, tem-se:

$$-B \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n p_m (k + g_m)(k + g_m + g_n) e^{j(k+g_m+g_n)x} + \omega^2 \rho \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n p_m e^{j(k+g_m+g_n)x} = 0. \quad (8)$$

Multiplicando a Eq. (8) por $\frac{-1}{a} e^{-j(k+g_r)x}$ onde $g_r = 2\pi r/a$ e integrando de $-a/2$ a $a/2$ tem-se:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [B A_n (k + g_m)(k + g_m + g_n) - \omega^2 \rho A_n] p_m \frac{1}{a} \int_{-a/2}^{a/2} e^{j(g_m+g_n-g_r)x} dx = 0. \quad (9)$$

A integral da Eq. (9) tem como resultado 1 quando $n = r - m$ e 0 caso contrário. Reescrevendo e rearrajando a Eq. (9) e fazendo $\lambda = \omega^2$:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} B A_{r-m} (k + g_m)(k + g_r) p_m = \lambda \sum_{m=-\infty}^{\infty} \rho A_{r-m} p_m, \quad (10)$$

o que resulta em um sistema com infinitas equações. Para resolver o sistema, pode-se truncar a série de Fourier nos primeiros M termos, ou seja, r e $m \in [-M, \dots, M] \in \mathbb{Z}$. Reescrevendo a Eq. (10) na forma matricial obtém-se o autoproblema:

$$\mathbf{B}\mathbf{p} = \lambda \mathbf{C}\mathbf{p}, \quad (11)$$

cujas soluções produzem o diagrama de dispersão.

3. MÉTODO DA MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA

O método da matriz de transferência fundamenta-se na formulação acústica da onda plana para uma célula unitária para obtenção de uma matriz de transferência (Munjal, 2014). Para o duto com câmara de expansão estudado, a célula unitária é dividida em 3 partes: dois dutos com diâmetro D_b e uma câmara de expansão com diâmetro D_a (Fig. (1)).

A matriz de transferência para o duto principal é dada por (Munjal, 2014):

$$T_d = \begin{bmatrix} \cos(kL_b) & j \frac{\rho c}{S_b} \sin(kL_b) \\ j \frac{S_b}{\rho c} \sin(kL_b) & \cos(kL_b) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

onde c é a velocidade do som no fluido e S_b área da seção transversal do duto. Para a câmara de expansão, a matriz de transferência será:

$$T_{ce} = \begin{bmatrix} \cos(kL_a) & j \frac{\rho c}{S_a} \sin(kL_a) \\ j \frac{S_a}{\rho c} \sin(kL_a) & \cos(kL_a) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Assim, de posse das matrizes de transferência, pode-se encontrar a matriz para a célula unitária

$$T_{celula} = T_d \cdot T_{ce} \cdot T_d. \quad (14)$$

A pressão acústica e a velocidade de volume nas extremidades direita e esquerda de uma célula periódica são dadas por

$$\begin{bmatrix} p_l \\ U_l \end{bmatrix} = T_{celula} \begin{bmatrix} p_r \\ U_r \end{bmatrix}, \quad (15)$$

onde p_r e p_l são as pressões acústicas e U_r e U_l são as velocidades de volume. Os subscritos r e l representam o lado direito e esquerdo, respectivamente. Reescrevendo a Eq. (15) de forma compacta, tem-se:

$$\mathbf{q}_l = T_{celula} \mathbf{q}_r. \quad (16)$$

Considerando agora as células unitárias consecutivas n e $n+1$ e aplicando as condições de continuidade na velocidade de volume e pressões acústicas tem-se que $q_r^n = q_l^{n+1}$. Reescrevendo a Eq. (16):

$$\mathbf{q}_l^{n+1} = T_{celula} \mathbf{q}_l^n. \quad (17)$$

Quando o teorema de Bloch-Floquet para propagação de ondas é aplicado em um sistema periódico de células unitárias, produz:

$$\mathbf{q}_l^{n+1} = e^{\mu} \mathbf{q}_l^n, \quad (18)$$

onde $\mu = -jka$ é o coeficiente de atenuação na célula. Substituindo a Eq. (18) na Eq. (17) e descartando os sub e sobrescritos, gera:

$$T_{\text{célula}} \mathbf{q} = e^{\mu} \mathbf{q}, \quad (19)$$

onde e^{μ} é o autovalor e $\mathbf{q}$ são os autovetores correspondentes. Resolvendo o problema de autovalor/autovetor obtém-se o diagrama de dispersão.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

A simulação numérica do sistema acústico com câmaras de expansão periódicas foram realizados usando os modelos TMM e PWE implementados em ambiente Matlab. Os dados da geometria das câmaras e propriedades do ar para todos os resultados simulados foram obtidos de Lima *et al.* (2019) e estão descritos na Tabela 1. A banda de frequências analisada varia de 0 a 1000 Hz.

Tabela 1: Geometria e propriedades das câmaras

Velocidade do som no ar (c)	343 [m/s]
Densidade do ar (ρ)	1,21 [kg/m ³]
Diâmetro do duto (D_b)	0,0375 [m]
Comprimento do duto (L_b)	0,15 [m]
Diâmetro da câmara de expansão (D_a)	0,145 [m]
Comprimento da câmara de expansão (L_a)	0,165 [m]

O diagrama de dispersão para o sistema acústico de câmaras de expansão periódicas é apresentado na Figura 2. Estes resultados foram obtidos por TMM e PWE e são comparados com o resultado obtido por Lima *et al.* (2019).

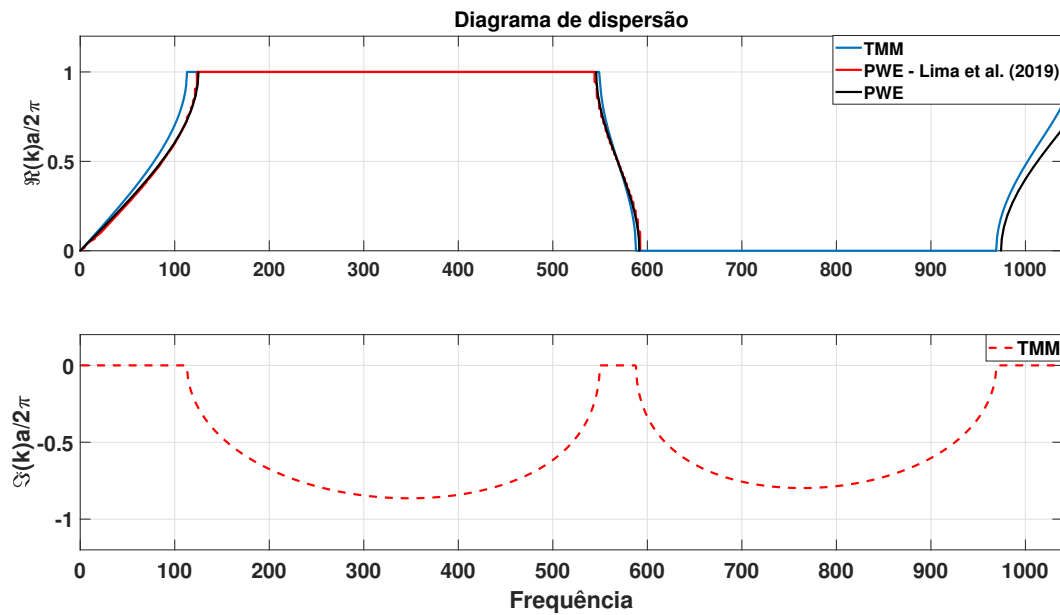


Figura 2: Diagrama de dispersão para o sistema acústico de câmaras de expansão periódicas.

Tanto o PWE quanto o TMM concordam com os resultados obtidos por Lima *et al.* (2019). Nota-se que pelo TMM obtém-se resposta tanto real quanto imaginária, enquanto que para o PWE apenas a parte real é encontrada. Este fato ocorre devido a solução do PWE obter apenas as ondas puramente propagantes.

A parte real do número de onda de Bloch está ligada as ondas propagantes enquanto a parte imaginária do número de onda de Bloch refere-se as ondas não propagantes (ou ondas evanescentes). Ressalta-se que existem ondas evanescentes com valores de k que são complexos (Miranda Jr e Dos Santos, 2019). Pode-se observar que a parte real atinge um valor de π (o gráfico está normalizado, por isso aparece o valor 1 nesse ponto), chamado de limite de Bragg, na frequência de 115 Hz e continua constante até 549 Hz quando começa a decrescer até zero. Neste intervalo, as ondas não se propagam, tornando-se ondas não propagantes, o que é verificado pela parte imaginária que torna-se diferente de zero na mesma

banda de frequência. Em seguida, o segundo bandgap de Bragg encontra-se entre 600 e 980 Hz, onde k é puramente imaginário.

4.1 Análise dos parâmetros geométricos da câmara de expansão

Realizou-se mudanças no volume da câmara de expansão a fim de analisar sua influência nos bandgaps mostrados no diagrama de dispersão. Para isso, alterações no comprimento e diâmetro da câmara de expansão foram realizadas.

Na (Fig. 3), observa-se que o aumento do comprimento desloca os bandgaps que seguem o mecanismo de espalhamento de Bragg para frequências menores, evidenciando dois bandgaps no intervalo de frequência analisado. Quanto mais extenso o tamanho de um material fonônico, a banda proibida se apresentará em frequências mais baixas.

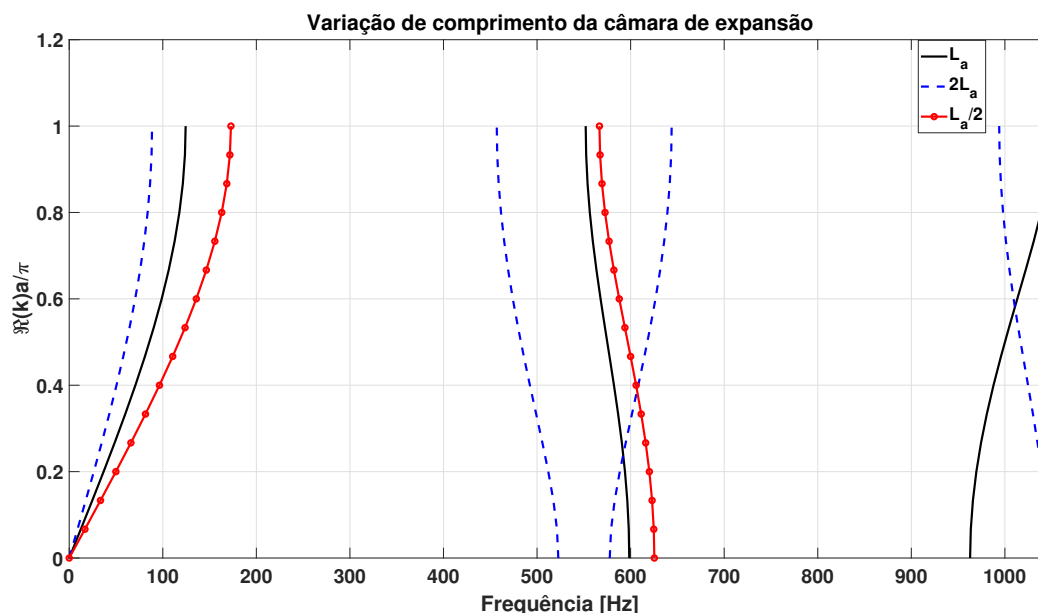


Figura 3: Diagrama de dispersão para diferentes comprimentos da câmara de expansão.

Ao modificar o diâmetro da câmara de expansão (Fig. 4), nota-se uma diminuição do intervalo de frequência onde a onda acústica não se propaga quando há a redução do diâmetro da câmara de expansão. Em contrapartida, ao aumentar o diâmetro, o bandgap se torna maior, fazendo com que ondas acústicas no intervalo de 80 a 580 Hz não se propaguem. Além disso, um diâmetro menor torna mais branda a variação da onda propagante em onda não propagante, enquanto o aumento do diâmetro torna essa variação mais abrupta.

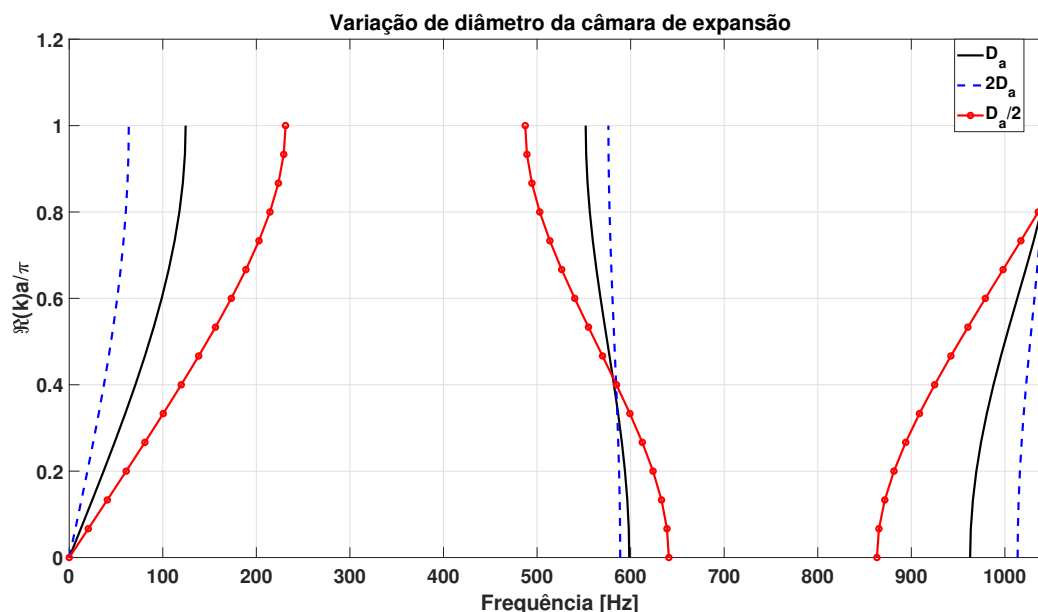


Figura 4: Diagrama de dispersão para diferentes diâmetros da câmara de expansão.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a atenuação de ruído em sistema de duto composto por câmaras de expansão dispostas periodicamente através do método de expansão de ondas planas (PWE) e os resultados foram comparados com o método de matriz de transferência (TMM).

Ademais, verificou-se como os parâmetros geométricos da câmara influenciam nos bandgaps gerados pelo espalhamento de Bragg. O aumento do diâmetro aumentou o intervalo das bandas proibidas, enquanto o aumento do comprimento, além de aumentar o intervalo das ondas evanescentes, trouxe o segundo bandgap para frequências menores que 1000 Hz.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das agências de fomento brasileiras CAPES (Código Financeiro 001), CNPq (Concessão No. 317436/2021, 151311/2020-0 e 403234/2021-2), FAPEMA (Concessão No. 02294/20, 00133/21 e PJC-00680/22), FAPESP (Concessão No. 2018/15894-0) e IFMA.

7. REFERÊNCIAS

- Assis, G.F.C.A., Beli, D., Miranda Jr, E.J.P., Camino, J.F., Dos Santos, J.M.C. e Arruda, J.R.F., 2019. "Computing the complex wave and dynamic behavior of one-dimensional phononic systems using a state-space formulation". *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 163, pp. 1–10. URL <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105088>.
- Blauert, J. e Xiang, N., 2009. *Acoustics for Engineers: Troy Lectures*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany. 253 p.
- Cai, C. e Mak, C.M., 2018. "Hybrid noise control in a duct using a periodic dual Helmholtz resonator array". *Applied Acoustics*, Vol. 134, pp. 119–124. URL <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.01.015>.
- Campos, B.V.L., 2018. *Controle de ruído em dutos usando metamateriais do tipo ressonadores de Helmholtz*. Master's thesis, Universidade de Campinas, Campinas - SP.
- Deery, D., Flanagan, L., O'Brien, G., Rice, H.J. and Kennedy, J., 2022. "Efficient modelling of acoustic metamaterials for the performance enhancement of an automotive silencer". *Acoustics*, Vol. 4, No. 2, pp. 329–344. URL <https://www.mdpi.com/2624-599X/4/2/20>.
- Gerges, S.N.Y., Jordan, R., Thieme, F.A., Bento Coelho, J.L. and Arenas, J.P., 2005. "Muffler modeling by transfer matrix method and experimental verification". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 132–140. URL <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.01.015>.
- Goto, A. e Dos Santos, J.M.C., 2019. "Sound attenuation of periodic micro-perforated chamber mufflers using the spectral transfer matrix method". In *XL CILAMCE*. Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Natal - RN, pp. 1–14.
- Goto, A.M., Nobrega, E.D., Pereira, F.N. and Dos Santos, J.M.C., 2020. "Numerical and experimental investigation of phononic crystals via wave-based higher-order rod models". *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 181, pp. 1–13. URL <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105776>.
- Guan, D., Wu, J.H., Jing, L., Gao, N. e Hou, M., 2015. "Application of a Helmholtz structure for low frequency noise reduction". *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 63, No. 1, pp. 20–25. URL <https://doi.org/10.3397/1/376303>.
- Lima, V.D., Assis, G.F.C.A., Dos Santos, J.M.C., Camino, J.F. e Arruda, J.R.F., 2019. "Shape optimization and forced response of phononic crystals using a spatial state space formulation". In *Proceedings of the XVIII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics*. ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 1–4.
- Miranda Jr, E.J.P. e Dos Santos, J.M.C., 2019. "Flexural wave band gaps in multi-resonator elastic metamaterial Timoshenko beams". *Wave Motion*, Vol. 91, pp. 1–23. URL <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2019.102391>.
- Miranda Jr, E.J.P., Rodrigues, S.F., Aranas Jr, C. e Dos Santos, J.M.C., 2022. "Plane wave expansion and extended plane wave expansion formulations for Mindlin-Reissner elastic metamaterial thick plates". *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 505, No. 2, pp. 1–16. URL <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2021.125503>.
- Munjal, M.L., 2014. *Acoustics of Ducts and Mufflers*. John Wiley and Sons, Bangalore, Índia. 399 p.
- Nobrega, E.D., Gautier, F., Pelat, A. e Dos Santos, J.M.C., 2016. "Vibration band gaps for elastic metamaterial rods using wave finite elements method". *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 79, pp. 192–202. URL <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.02.059>.
- Rosa, M.I.N., Lima, V.D., Dos Santos, J.M.C. e Arruda, J.R.F., 2017. "Numerical and experimental investigation of interface modes in periodic acoustic waveguides". In *Proceedings of the International Conference on Structural Engineering Dynamics*. ICEDyn 2017, Ericeira, pp. 1–10.
- Selamet, A. e Lee, I., 2003. "Helmholtz resonator with extended neck". *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 113, No. 4, pp. 1975–1985.
- Wu, D., Zhang, N., Mak, C.M. e Cai, C., 2019. "Hybrid noise control using multiple Helmholtz resonator arrays". *Applied Acoustics*, Vol. 143, pp. 31–37. URL <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.023>.

Xiao, Y., Wen, J. e Wen, X., 2012. "Broadband locally resonant beams containing multiple periodic arrays of attached resonators". *Physics Letters A*, Vol. 376, pp. 1384–1390. URL <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2012.02.059>.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ACOUSTIC METAMATERIAL MODELING WITH EXPANSION CHAMBER USING THE PLANE WAVE EXPANSION METHOD (PWE)

L. S. Oliveira, l261283@dac.unicamp.br¹

V. G. R. C. Dos Santos, v228253@dac.unicamp.br¹

E. J. P. Miranda Jr., edson.jansen@ifma.edu.br^{1,2}

J. M. C. Dos Santos, zema@unicamp.br¹

¹ University of Campinas, Computational Mechanics Department

² Federal Institute of Maranhão

Abstract: *The attempt to influence the propagation of sound waves using metamaterials is a study of great interest in engineering. Effective low-frequency noise control is very challenging to isolate or absorb noise. Traditional materials have very limited control of sound waves. Thus, new artificial composite materials with excellent sound absorption are urgently needed to solve this problem. Composite materials, such as phononic crystals and metamaterials, can achieve very flexible control of mechanical waves. Researchers have developed new artificial acoustic metamaterials with sub-wavelength dimensions, which have characteristics such as miniaturization, integration and lightness, which have critical potential applications in several areas. The development of metamaterials has motivated new solutions for noise attenuation and control in acoustic systems. The objective of this article is to use analytical and numerical approaches to design an effective metamaterial using a periodic expansion chamber-duct acoustic device, modeled by the Plane Wave Expansion (PWE) method. PWE presents similar results to numerical methods based on finite elements, but with a considerably lower computational cost, thus indicating its advantage for optimization problems. Simulated examples of duct-expansion chamber metamaterials are performed and the results are compared with those obtained by the Transfer Matrix Method (TMM) and their sound attenuation efficiency is evaluated.*

Keywords: *expansion chamber, metamaterial, acoustics, PWE, TMM.*

The authors are solely responsible for the content of this work.