

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA À ACÚSTICA

Daniele Kempner Schultz, Eduardo Lenz Cardoso

### INTRODUÇÃO

O conforto acústico e a inteligibilidade são fatores críticos no design arquitetônico, uma vez que a intensidade sonora excessiva em diversas frequências pode comprometer tanto a saúde quanto a comunicação, pois níveis elevados de ruído não só induzem a fadiga e estresse ao ouvinte, mas também prejudicam a clareza da fala. Consequentemente, a redução do nível de pressão sonora é de grande interesse. Este trabalho propõe o uso da Otimização Topológica para o projeto de barreiras acústicas, com o objetivo de minimizar o Nível Médio de Pressão Sonora (SPL) em algumas regiões alvo de um domínio acústico.

### DESENVOLVIMENTO

A equação diferencial parcial linear para acústica (Jacobsen & Juhl, 2013) descreve a flutuação de pressão  $p(x, t)$  em um domínio  $\Omega$ . A solução analítica é conhecida para algumas condições específicas, mas para casos gerais, métodos numéricos são necessários (Prinn, 2023). O método dos Elementos Finitos (Jacobsen & Juhl, 2013; Prinn, 2023) é utilizado neste trabalho para solucionar essa equação, sendo que diversos tipos de elementos foram estudados e implementados. Dentre os diferentes tipos de análise que podem ser realizados, destaca-se a análise harmônica, onde assume-se que a excitação é aplicada em um conjunto de frequências angulares predefinidas, permitindo reescrever a equação dinâmica como um conjunto de sistemas lineares que dependem de cada frequência angular. A solução desse sistema fornece os níveis de pressão complexos (com amplitude e fase) para cada frequência (Jacobsen & Juhl, 2013). O objetivo deste trabalho é reduzir o nível de pressão sonora (SPL) em regiões específicas de um domínio acústico e um conjunto de frequências de excitação predefinidas. A redução é quantificada pelo SPL médio, que considera a pressão nos pontos selecionados, o número total de frequências e o número de pontos na região de interesse. A otimização topológica busca minimizar a SPL média, sujeita as restrições de volume e aos limites das variáveis de projeto  $\gamma_e$ , que indicam a presença de ar ( $\gamma_e \rightarrow 0$ ) ou material sólido ( $\gamma_e \rightarrow 1$ ) em cada elemento do domínio (Dühring et al., 2008; Pereira et al., 2022). O processo de otimização requer o cálculo das derivadas das funções em relação às variáveis de projeto, que foram obtidas utilizando-se o método adjunto aplicado a problemas harmônicos (Valentini et al., 2021). A distribuição otimizada de material é realizada utilizando-se o método BESO (Bidirectional Evolutionary Structural Optimization) (Yang et al., 1999; Zuo & Xie, 2015) e o limite de volume é ajustado dinamicamente em cada interação por meio de um índice evolutivo, evitando mudanças abruptas no projeto. Diferentemente de outros métodos contínuos, o BESO utiliza variáveis de projeto discretas (material ou vazio), tal que os resultados contêm somente ar ou material sólido (barreira).

### RESULTADOS

Toda a implementação computacional, utilizando a linguagem Julia (Bezanson et al., 2017), está disponível em um repositório gratuito e aberto no Github. A base para a implementação é o software *open source LS*ound para Elementos Finitos 2D e 3D em Acústica Linear [<https://github.com/CodeLenz/LSound.git>], também desenvolvido pelos autores (Schultz & Cardoso, 2024). O software GMSH (Geuzaine & Remacle, 2020) foi utilizado como ambiente de pré e pós-processamento, por meio do *Lgmsh* (<https://github.com/CodeLenz/Lgmsh>), um pacote desenvolvido para facilitar a importação e exportação de dados.

Um caso teste considerou a otimização de um cômodo retangular de  $18 \times 8 m$ , com uma área de projeto de  $18 \times 1 m$  no teto (Dühring et al., 2008). O objetivo foi distribuir material sólido no teto para minimizar o SPL na borda do domínio alvo  $\Omega_{op}$ , devido a uma excitação aplicada na fronteira do domínio fonte  $U$ , como ilustrado em (b) da Fig. 1. A distribuição de pressão a 42,5 Hz e sem a barreira é ilustrada em (a) da Fig. 1. A distribuição otimizada de material é ilustrada em (b) Fig. 1 e a distribuição de pressão a 42,5 Hz na configuração otimizada é ilustrada em (d) da Fig. 1.

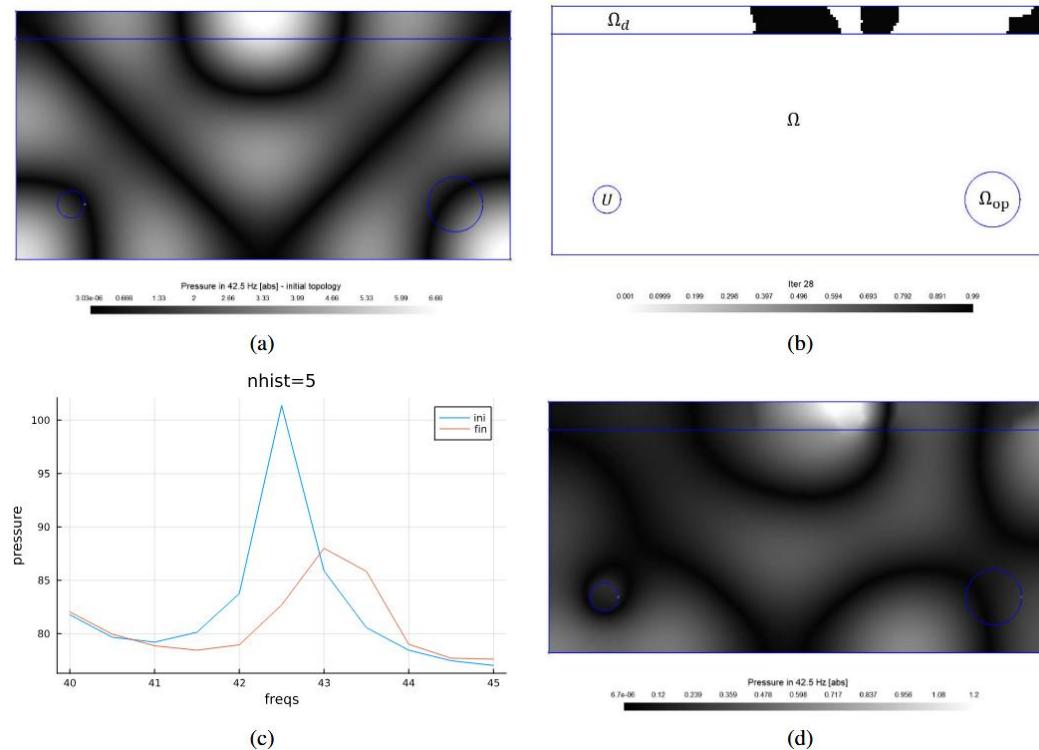
A fração de volume máximo de material sólido foi limitada a 15%. A malha utiliza elementos bilineares isoparamétricos de 4 nós, cada um com dimensão de  $0,1 \times 0,1 m$ . A faixa de frequências considerada foi [40,0 a 45,0] Hz, com discretização de 0,5 Hz. Após 50 iterações, o SPL foi reduzido de 77,64 dB para 68,80 dB, conforme ilustrado na FRF em (c) da Fig. 1.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho explorou uma implementação de código aberto de um programa de otimização topológica para acústica. O Método dos Elementos Finitos e a abordagem de otimização BESO são usados para o projeto de barreiras acústicas, com foco na redução da intensidade sonora em faixas específicas de frequência de regiões predefinidas do domínio acústico. Os resultados demonstram melhora na resposta acústica devido à alteração na configuração dos modos de pressão, provocada pela distribuição otimizada e discreta do material.

**Palavras-chave:** Otimização topológica; BESO; Elementos finitos; Nível de pressão sonora; Análise adjunta.

## ILUSTRAÇÕES



**Figura 1.** (a) Distribuição de pressão inicial para 42,5 Hz. (b) Distribuição otimizada do material. (c) Resposta em frequência para os projetos original (azul) e otimizado (vermelho). (d) Distribuição de pressão otimizada a 42,5 Hz.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S., & Shah, V. B. (2017). Julia: A fresh approach to numerical computing. *SIAM Review*, 59(1), 65-98. <https://doi.org/10.1137/141000671>.

DUHRING, M. B., Jensen, J. S., & Sigmund, O. (2008). Acoustic design by topology optimization. *Journal of Sound and Vibration*, 317(3), 557-575. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.03.042>.

Geuzaine, C., & Remacle, J. F. (2020). Gmsh. <http://gmsh.info/>.

Jacobsen, F., & Juhl, P. M. (2013). *Fundamentals of General Linear Acoustics*. Wiley. ISBN: 9781118636176.

PEREIRA, R. L., Lopes, H. N., & Pavanello, R. (2022). Topology optimization of acoustic systems with a multiconstrained BESO approach. *Finite Elements in Analysis and Design*, 201, 103701. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2021.103701>.

Prinn, A. G. (2023). A review of finite element methods for room acoustics. *Acoustics*, 5(2), 367-395. MDPI.

Schultz, D., & Cardoso, E. (2024). Development of a finite element program for acoustics. *Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*. <https://doi.org/10.55592/cilamce.v6i06.10340>.

VALENTINI, F., Silva, O. M., & Lenz Cardoso, E. (2021). Robust topology optimization for harmonic displacement minimization of structures subjected to uncertainty in the excitation frequency. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 379, 113767. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.113767>.

Yang, X. Y., Xie, Y. M., Steven, G. P., & Querin, O. M. (1999). Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization. *AIAA Journal*, 37(11), 1483-1488.

Zuo, Z. H., & Xie, Y. M. (2015). A simple and compact Python code for complex 3D topology optimization. *Advances in Engineering Software*, 85, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.02.006>.

---

## DADOS CADASTRAIS

---

**BOLSISTA:** Daniele Kempner Schultz

**MODALIDADE DE BOLSA:** PIBIC/CNPq (IC)

**VIGÊNCIA:** 01/09/2024 a 31/08/2025 – Total: 12 meses

**ORIENTADOR(A):** Eduardo Lenz Cardoso

**CENTRO DE ENSINO:** CCT

**DEPARTAMENTO:** Departamento de Engenharia Mecânica CCT

**ÁREAS DE CONHECIMENTO:** Engenharias / Engenharia Mecânica / Métodos de Síntese e  
Otimização Aplicados ao Projeto Mecânico

**TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA:** Simulação numérica aplicada à Acústica.

**Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA:** NPP2665-2023 - Otimização Topológica de  
meios contínuos