

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 $p(\mathbf{x}, t)$ em um domínio Ω . 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 γ_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* **LSound** 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 $18 \times 8 \text{ m}$, com uma área de projeto de $18 \times 1 \text{ m}$ no teto (Dühring et al., 2008). O objetivo foi distribuir material sólido no teto para minimizar o SPL na borda do domínio alvo Ω_{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 $0,1 \times 0,1 \text{ m}$. A faixa de frequências considerada foi $[40,0 \text{ a } 45,0] \text{ Hz}$, 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

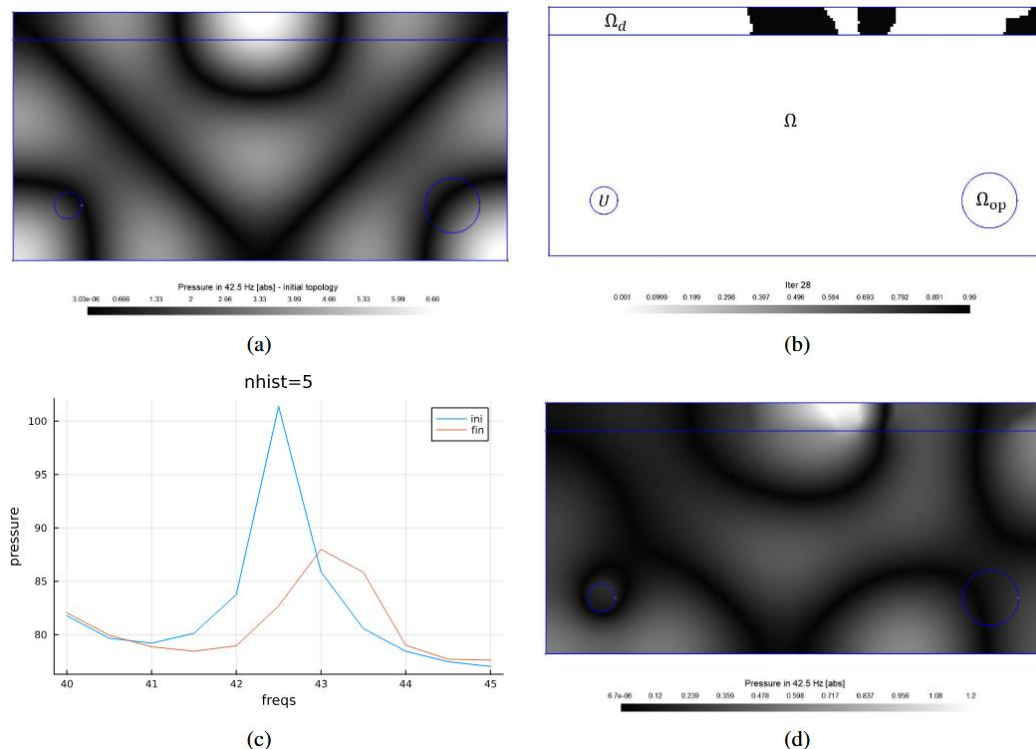


Figura 1. (a) Distribuição de pressão inicial para 42,5 Hz. (b) Distribuição otimizada do material. (c) Resposta em frequência para os projetos original (azul) e otimizado (vermelho). (d) Distribuição de pressão otimizada a 42,5 Hz.

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://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