



ANÁLISE MODAL ACÚSTICA DE ESTRUTURAS TPMS GIROIDE, DIAMANTE E HÍBRIDAS

André da Fonseca Silva¹, Maria Alzira de Araújo Nunes²

^{1,2} Universidade de Brasília, Programa de Pós Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia, St. Leste Projeção A - Gama Leste, Brasília - DF, 72444-240

RESUMO: Este estudo analisa o comportamento modal de estruturas TPMS (giroide, diamante e híbridas) com 50% de densidade relativa. Modeladas via MATLAB® e simuladas no ANSYS®, as amostras revelam que a topologia e a ordem das camadas impactam significativamente as frequências de ressonância acústica. Os resultados demonstram que a geometria, e não apenas a densidade relativa, é uma variável de projeto crucial para a engenharia acústica moderna, permitindo o ajuste preciso das propriedades vibratórias.

Palavras-chave: TPMS; estrutura giroide; estrutura diamante; análise modal.

INTRODUÇÃO

Materiais porosos baseados em *Triply Periodic Minimal Surfaces* (TPMS) são metamateriais acústicos promissores pela baixa densidade, rigidez e sintonização de ressonâncias. Topologias como giroide e diamante possuem tortuosidade e conectividade distintas, como pode ser visto pela Figura 1, influenciando diretamente o acoplamento entre a geometria e os modos acústicos (Yang et al., 2025). A modelagem modal dessas estruturas demonstra que a topologia e a escala da célula determinam a localização das ressonâncias de forma mais determinante que a densidade em regimes de porosidade média a alta, sendo fundamental para deslocar modos de vibração para faixas onde absorvedores convencionais falham (Lomte et al., 2024).

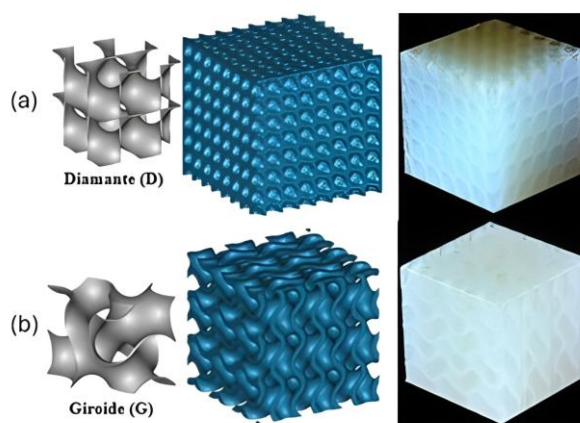


Figura 1: Estruturas TPMS: (a) diamante e (b) giroide. Fonte: Al-Ketan et al. (2016).

Neste contexto, este artigo propõe uma análise modal acústica comparativa entre estruturas TPMS do tipo giroide e diamante, bem como a combinação de amostras (giroide–

¹ Discente, Engenheiro Automotivo

² Docente, Engenheira Mecânica

diamante e diamante-giroide), com o objetivo de identificar qual configuração obtém as frequências naturais mais baixas, visando a otimização de dispositivos para atenuação sonora em bandas de frequência reduzidas sem acréscimo de massa. A densidade relativa (ρ_{rel}) é mantida em 50%, enquanto a geometria é projetada para investigar a influência da macroescala (dimensão da célula e espessura total) e das propriedades topológicas intrínsecas (como a continuidade de poro) na sintonização acústica.

METODOLOGIA

As arquiteturas TPMS (giroide e diamante) foram geradas utilizando o toolbox LattGen no ambiente MATLAB®. As estruturas foram projetadas com 1 célula unitária por orientação (1×1), visando manter simplicidade e controle paramétrico. A densidade volumétrica foi ajustada em aproximadamente 50%, o que confere às estruturas maior rigidez mecânica, porém ainda com porosidade suficiente para permitir a penetração de ondas sonoras. As amostras individuais apresentam comprimento total de 50 mm na direção de propagação do som, como evidenciado pela Figura 2. Posteriormente, esses modelos foram importados para o software ANSYS®, onde passaram por operações de ajuste dimensional para um diâmetro de 60 mm, equivalente à geometria interna de um porta-amostras de tubo de impedância. As amostras individuais possuem 50 mm de comprimento na direção de incidência, enquanto as configurações híbridas foram obtidas pela combinação dessas amostras, resultando em corpos de prova com 100 mm de extensão total.

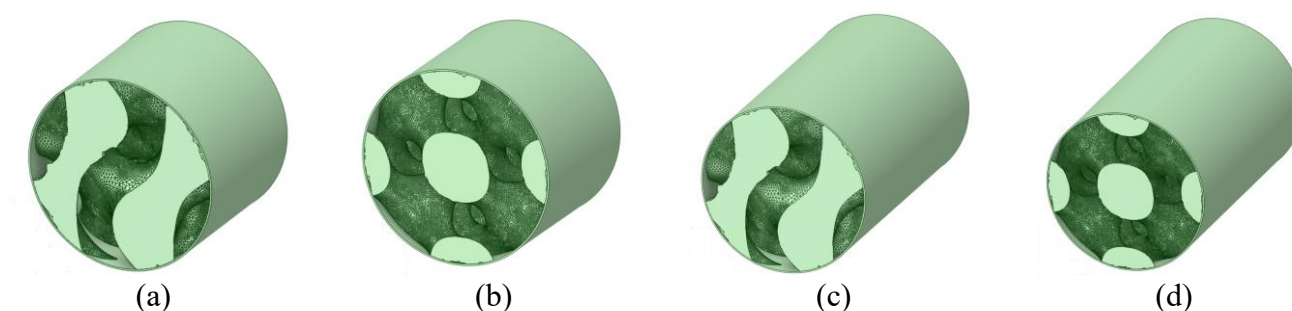


Figura 2: Modelagem das estruturas: (a) giroide, (b) diamante, (c) giroide-diamante e (d) diamante-giroide.

Considerando a velocidade do som no ar de $c = 343$ m/s e a frequência máxima de 6.000 Hz, calculou-se o comprimento de onda mínimo de 57,16 mm, sendo obtido através da relação fundamental expressa pela Equação 1:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Em que λ é o comprimento de onda; c é a velocidade do som no meio e f é a frequência máxima.

O critério usual de discretização em acústica requer ao menos seis elementos por comprimento de onda para o método de elementos finitos, o que permitiria elementos de até 9,52 mm. Entretanto, devido à alta complexidade geométrica e às curvaturas intrínsecas dos canais das estruturas TPMS, adotou-se um tamanho global de elemento significativamente

menor, de 0,5 mm, visando a fidelidade da microescala. Após a geração da malha no ambiente de pré-processamento do software ANSYS®, esse refinamento resultou estatisticamente em 161.981 nós e 775.992 elementos tetraédricos lineares.

Para a análise, empregou-se uma abordagem modal linear sob condição livre-rígido utilizando o software Ansys 2025 R2®. Na face transversal de incidência, impôs-se pressão acústica nula (0 Pa), representando uma extremidade aberta, enquanto as demais superfícies foram modeladas como paredes rigidamente refletoras (Rigid Wall), assegurando velocidade normal nula, garantindo o confinamento necessário para a identificação dos modos naturais de cavidade, como exposto pela Figura 3. O principal resultado foi o campo de pressão acústica, obtido via análise modal, permitindo a identificação dos modos naturais e da distribuição de energia sonora nas estruturas analisadas. Foram extraídos seis modos de vibração, suficientes para avaliar a influência da topologia e do número de camadas nas frequências naturais.

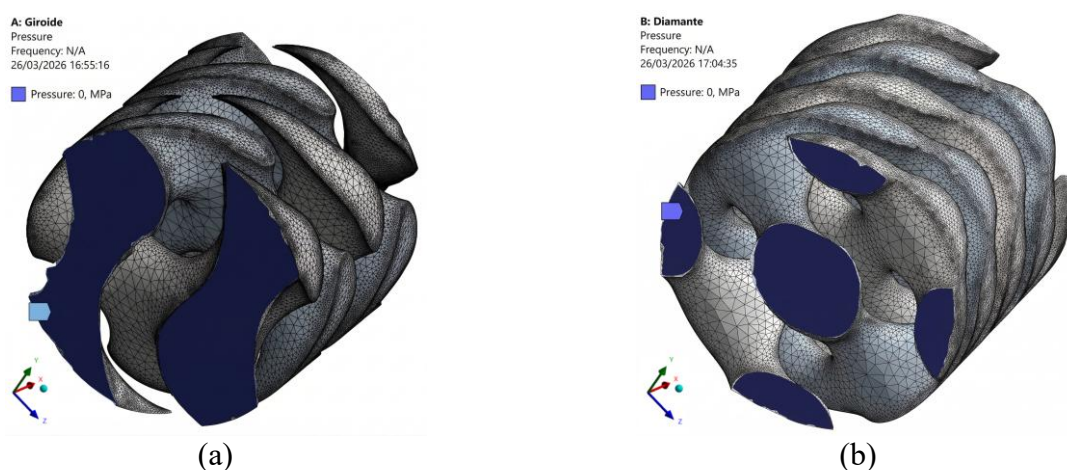


Figura 3: Detalhe da malha tetraédrica e aplicação das condições de contorno: (a) giroide e (b) diamante.

Após a definição dos parâmetros de malha e das condições de contorno ilustradas na Figura 2, o sistema foi processado para a extração dos seis primeiros modos de vibração. Essa abordagem permitiu capturar com precisão a distribuição do campo de pressão acústica e identificar as frequências naturais características de cada configuração.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados evidencia que a topologia interna é um parâmetro determinante na sintonização acústica, mesmo sob densidade volumétrica constante de 50%. A estrutura Giroide apresentou uma frequência natural de 681,94 Hz no primeiro modo, valor 18,06% superior ao observado na estrutura Diamante, que registrou 577,61 Hz, como percebido na Tabela 1. Tal discrepância quantifica o impacto da microescala no sistema, visto que a geometria diamante possui canais com maior tortuosidade intrínseca, o que retarda a propagação da frente de onda ao impor um caminho efetivo mais longo para o fluido em comparação à Giroide. Consequentemente, os dados demonstram que a topologia Diamante permite uma sintonização 15,3% mais eficiente para o controle de ruídos em baixas frequências utilizando a mesma espessura de 50 mm.

Quanto às configurações de 100 mm, a combinação de amostras resultou em uma redução drástica nas frequências naturais, sendo que a ordem de posicionamento das topologias

revelou-se uma variável crítica para a resposta modal do sistema. A configuração Diamante-Giroide obteve uma frequência fundamental de 281,84 Hz, valor 15,4% inferior à configuração Giroide-Diamante (333,15 Hz), evidenciando que posicionar a rede de maior tortuosidade na face de incidência favorece o deslocamento dos modos de cavidade para bandas de frequência menores. Além disso, a configuração Diamante-Giroide apresentou uma redução de 51,2% na frequência natural em relação à estrutura Diamante individual de 50 mm, indicando que o ganho na atenuação de graves decorre da interação complexa entre a sequência de impedâncias e o aumento do caminho acústico total.

Tabela 1: Resultados obtidos pela análise modal das estruturas.

Estruturas	Comprimento	Modos Acústicos (Hz)					
		1	2	3	4	5	6
Giroide	50 mm	681,94	728,95	1128,5	1578,4	1985,3	2193,7
Diamante	50 mm	577,61	577,88	1673,0	1709,8	1860,8	2489,5
Giroide-Diamante	100 mm	333,15	521,08	900,26	1094,8	1394,7	1526,4
Diamante-Giroide	100 mm	281,84	521,49	922,06	1059,8	1117,6	1390,8

Os resultados reforçam a ideia de que a densidade absoluta não é o fator predominante na localização das frequências de ressonância mais baixas em TPMS. Em vez disso, a tortuosidade da rede, a continuidade de poro e a ordem das camadas assumem papel central na sintonização acústica

CONCLUSÕES

Este artigo demonstrou que, mantendo a densidade volumétrica fixa em aproximadamente 50%, a topologia TPMS e a ordem de camadas influenciam significativamente as frequências naturais mais baixas em estruturas giroides e diamantes. Portanto, conclui-se que a geometria da célula unitária deve ser tratada como variável de projeto, explorando a macroescala (dimensão da célula e espessura) e a microescala (tortuosidade e continuidade de poro) para posicionar as frequências de ressonância mais baixas em faixas de interesse.

REFERÊNCIAS

LOMTE, Amulya; YANG, G.; SHARMA, Bhisham. Sustainable multifunctionality: Bio-inspired printing of nanocellulose aerogel acoustical materials. Advanced Materials Technologies, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/admt.202400232>.

YANG, G.; DENG, M.; ZHANG, M.; YIN, S. Multicavity structures with triply periodic minimal surface for broadband and perfect sound absorption manufactured by laser powder bed fusion. Manufacturing Service and Applied Materials, 2025. DOI: <https://doi.org/10.36922/msam.5737>.