XXXI ENCONTRO SOBRAC
SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA
Ouro Preto - MG 2026

Investigação experimental do coeficiente de absorção sonora de diferentes amostras cilíndricas fabricadas por impressão 3D (FDM) em PLA em função do preenchimento

Resumo

Este trabalho apresenta uma investigação experimental do coeficiente de absorção sonora de amostras cilíndricas de PLA fabricadas por impressão 3D em filamento fundido (FDM/FFF) e formadas apenas por preenchimento, sem paredes nem camadas de base e topo, com 30 mm de diâmetro. O objetivo foi avaliar a influência do tipo de preenchimento, da porcentagem de preenchimento e da altura da amostra, visando apoiar o desenvolvimento de módulos dissipativos acopláveis a silenciadores metamateriais acústicos ultra-abertos. As medições foram realizadas em tubo de impedância com dois microfones, conforme a ASTM E1050, adotando-se a faixa principal de análise entre 200 e 4000 Hz. Inicialmente, compararam-se Gyroid, TPMS-D e TPMS-FK em 10%, 20% e 30%. Em seguida, realizou-se uma varredura Gyroid entre 10% e 99,99%, além de uma condição sólida de 100%. Por fim, avaliou-se o efeito da altura em 70%, 80% e 90%, com amostras de 25, 50 e 75 mm de altura. Os resultados indicaram pouca influência do tipo de preenchimento na faixa inicial. As maiores absorções médias ocorreram em torno de 70% e 80%, enquanto o aumento da altura deslocou a absorção para frequências mais baixas. Os resultados demonstram a possibilidade de ajustar estruturas porosas artificiais diretamente por parâmetros de fatiamento.

Palavras-chave: absorção sonora, impressão 3D, tubo de impedância, preenchimento, meio poroso artificial.

Experimental investigation of the sound absorption coefficient of different cylindrical PLA samples manufactured by FDM 3D printing as a function of infill

Abstract

This work presents an experimental investigation of the sound absorption coefficient of cylindrical PLA samples manufactured by fused filament fabrication (FFF) 3D printing and composed only of infill, without walls or top and bottom layers, with a diameter of 30 mm. The objective was to evaluate the influence of infill pattern, infill percentage, and sample height, aiming to support the development of dissipative modules that can be coupled to ultra-open acoustic metamaterial silencers. The measurements were performed in an impedance tube with two microphones, according to ASTM E1050, adopting the 200–4000 Hz range as the main analysis band. Initially, Gyroid, TPMS-D, and TPMS-FK patterns were compared at 10%, 20%, and 30% infill. Then, a Gyroid infill sweep from 10% to 99.99% was carried out, in addition to a 100% solid condition. Finally, the effect of height was evaluated at 70%, 80%, and 90% infill, using samples with heights of 25, 50, and 75 mm. The results indicated little influence of the infill pattern in the initial range. The highest average absorption values occurred around 70% and 80% infill, while increasing the sample height shifted the absorption toward lower frequencies. The results demonstrate the possibility of tuning artificial porous structures directly through slicing parameters.

Keywords: *sound absorption, 3D printing, impedance tube, infill, artificial porous medium.*

1. Introdução

Materiais porosos e fibrosos são amplamente empregados no controle passivo de ruído por converterem parte da energia acústica incidente em calor, principalmente por perdas viscosas e térmicas associadas ao movimento do ar nos poros. O desempenho desses materiais depende de parâmetros como a resistência ao fluxo, tortuosidade, porosidade, espessura, condição de montagem, sendo a absorção em baixas frequências particularmente difícil porque, em geral, exige maiores espessuras de material [1, 2].

Metamateriais e materiais acústicos arquitetados ampliaram as possibilidades de controle de ondas por meio de geometrias projetadas. Embora muitas soluções sejam baseadas em ressonâncias, também há interesse crescente em estruturas dissipativas e híbridas, nas quais a topologia interna é ajustada para produzir absorção em diversas bandas [3, 4]. A manufatura aditiva é essencial nesse contexto, pois permite fabricar peças tridimensionais complexas e reproduzir variações geométricas diretamente a partir de modelos computacionais [5].

Na fabricação por fusão de filamento (FFF), parâmetros normalmente associados à economia de material e à resistência mecânica - como o tipo e a porcentagem de preenchimento - também definem a dimensão dos canais, a área superficial e a resistência imposta ao movimento oscilatório do ar. Dessa forma, uma peça impressa sem paredes e camadas de topo pode ser investigada como um meio poroso artificial cuja resposta acústica é ajustável no próprio fatiador [6].

O presente artigo faz parte do desenvolvimento de uma dissertação voltada a silenciadores metamateriais ultra-abertos e multifrequenciais. Uma etapa da pesquisa prevê a inserção de um módulo anular dissipativo, impresso somente por preenchimento, na região de passagem direta de ar de um silenciador ultra-aberto. A estrutura helicoidal ressonante periférica e o módulo poroso central teriam funções complementares: a primeira produziria atenuação seletiva, enquanto o segundo ampliaria a dissipação por absorção. Para obter o modelo final, tornou-se necessário identificar uma configuração de preenchimento que fosse a mais eficiente em termos de desempenho acústico.

Assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar experimentalmente o coeficiente de absorção sonora em incidência normal de amostras cilíndricas de PLA constituídas apenas pelo preenchimento gerado no software de fatiamento. A pesquisa foi organizada em três etapas sucessivas: comparação de três tipos de preenchimento em 10%, 20% e 30%; varredura do tipo Gyroid entre 10% e 99,99%; e avaliação de 70%, 80% e 90% em alturas de 25, 50 e 75 mm. Além das curvas contínuas, foram analisados índices médios da faixa medida, subfaixas de frequência e bandas de 1/3 de oitava.

2. Fundamentação teórica

Esta seção reúne os conceitos necessários para interpretar as amostras impressas como meios porosos e para relacionar os resultados ao desenvolvimento do silenciador modular proposto.

2.1 Absorção sonora em meios porosos artificiais

Em incidência normal, o coeficiente de absorção sonora representa a fração da potência acústica incidente que não retorna ao campo refletido. Para uma terminação passiva, idealmente, esse coeficiente varia entre zero e um. Quando uma onda sonora penetra em uma rede de poros interconectados, o movimento relativo entre o ar e as superfícies sólidas gera perdas viscosas nas camadas-limite. As compressões e rarefações também promovem trocas térmicas com as paredes dos canais. A energia acústica associada a esses processos é convertida em calor, reduzindo a parcela refletida [2].

Uma estrutura excessivamente aberta oferece pouca superfície para interação e baixa resistência ao movimento do ar. No extremo oposto, uma estrutura muito fechada pode reduzir a permeabilidade e aumentar o descasamento de impedância na superfície, elevando a reflexão. Consequentemente, não se

espera que a absorção cresça indefinidamente com a porcentagem de preenchimento: deve existir uma região intermediária em que resistência ao fluxo, porosidade e percurso interno se combinam de maneira mais favorável [2, 6, 7].

Em estruturas impressas por FDM, o "poro" não é aleatório como em uma espuma, mas definido pela trajetória de extrusão, espaçamento entre as deposições de filamento e conexões entre camadas. Por isso, a peça pode ser interpretada como um meio poroso artificial, cujo desempenho depende diretamente dos parâmetros de fatiamento. Para um absorvedor poroso apoiado sobre terminação rígida, o aumento da espessura alonga o caminho de propagação e tende a transferir a região de maior absorção para frequências inferiores. Estudos com estruturas Gyroid e outros TPMS também observaram redução da frequência do primeiro máximo com o aumento da altura, associada ao maior caminho interno e à alteração da impedância efetiva [2, 7].

2.2 Método de função de transferência em tubo de impedância

No método de dois microfones, uma onda sonora é gerada em uma extremidade do tubo e incide normalmente sobre a amostra posicionada junto a uma terminação rígida [8]. A ASTM E1050 descreve o uso de tubo de impedância, duas posições de microfone e sistema digital de análise de frequência para determinar coeficientes de absorção sonora em incidência normal.

A partir do coeficiente complexo de reflexão, R(f), calcula-se o coeficiente de absorção sonora conforme a Equação (1).

$$\alpha(f) = 1 - |R(f)|^2 \tag{1}$$

Além da curva contínua *α(f)*, foi utilizado um índice médio de banda larga, definido pela área normalizada sob a curva entre 200 e 4000 Hz, conforme a Equação (2). Essa métrica sintetiza a resposta global em toda a faixa considerada.

$$\bar{\alpha}(f)_{200-400} = \left[1/(4000 - 200)\right] \int_{200}^{4000} \alpha(f)\, df \tag{2}$$

As médias por bandas de 1/3 de oitava foram calculadas usando apenas bandas completamente contidas na faixa adotada. As frequências centrais utilizadas foram 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 e 3150 Hz.

2.3 Tipos de preenchimento

No fatiamento, o padrão de preenchimento define a trajetória de deposição do material no interior da peça e, portanto, a forma como o volume é ocupado. Mesmo sob uma mesma porcentagem nominal, diferentes padrões podem apresentar conectividade, regularidade entre camadas, tempo de impressão e consumo de material distintos [9], além de alterar a propagação sonora no interior da estrutura impressa [6]. Os tipos de preenchimento nesta pesquisa foram escolhidos em função da capacidade, a princípio, de gerar canais porosos em uma superfície contínua.

O Gyroid corresponde a uma superfície contínua e interconectada, sem linhas retilíneas predominantes, caracterizada por transições suaves e por uma rede tridimensional de canais. No contexto deste trabalho, essa característica o torna visualmente compatível com a ideia de meio poroso artificial, além de ser um padrão amplamente disponível em fatiadores. O TPMS-D, associado à superfície Schwarz Diamond, apresenta células com morfologia mais facetada, combinando regiões diagonais e transições periódicas. Já o TPMS-FK, associado à superfície Fischer-Koch S, apresenta curvatura mais complexa e trajetórias onduladas mais densas, o que pode resultar em maior complexidade de fatiamento [9]. A Figura 1 mostra os três tipos de preenchimento utilizados.

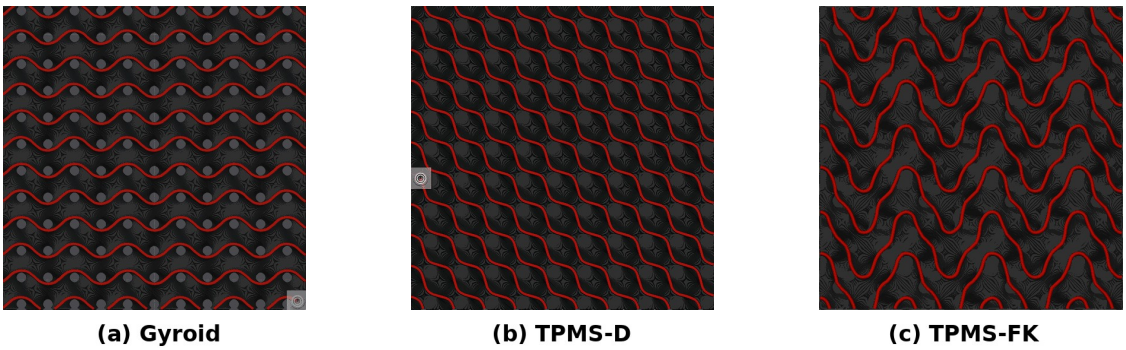


Figura 1: Representação dos padrões de preenchimento utilizados no estudo: (a) Gyroid, (b) TPMS-D e (c) TPMS-FK. Adaptado do OrcaSlicer Wiki [9].

2.4 Relação com o silenciador metamaterial modular

O silenciador ultra-aberto descrito por Ghaffarivardavagh et al. [10] utiliza a interação entre uma passagem central direta e caminhos helicoidais periféricos para produzir atenuação sonora por ressonância do tipo Fano. Essa configuração preserva uma área aberta para passagem de ar, mas sua resposta acaba sendo concentrada em faixas específicas de frequência. A proposta em desenvolvimento na dissertação consiste em manter o princípio do silenciador ultra-aberto e acrescentar um elemento dissipativo substituível, combinando a atenuação seletiva do metamaterial com a absorção produzida por uma estrutura porosa.

A Figura 2 apresenta uma representação conceitual do módulo anular. O anel ocuparia apenas parte da passagem direta, mantendo uma abertura central remanescente. O presente artigo não avalia o silenciador completo nem o efeito do módulo sobre o desempenho acústico; ele apresenta a etapa experimental de investigação do preenchimento a ser empregado em um protótipo posterior.

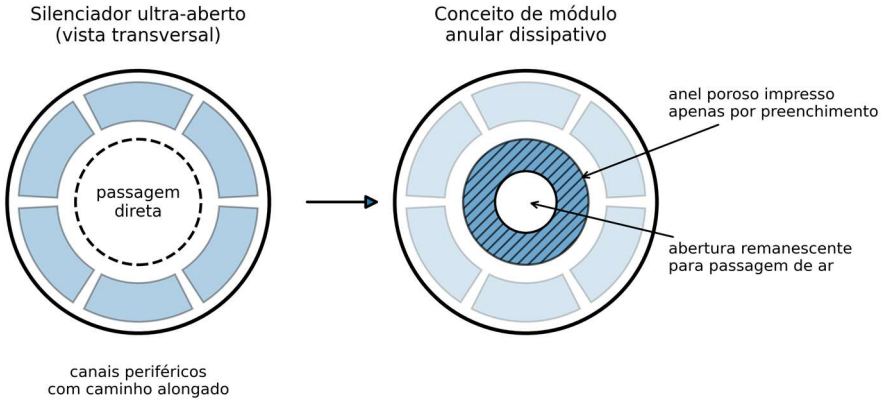


Figura 2: Representação conceitual, sem escala, da inserção de um módulo anular poroso na passagem direta de um silenciador metamaterial ultra-aberto.

3. Materiais e métodos

Esta seção descreve a fabricação dos corpos de prova, o planejamento experimental adotado e o procedimento utilizado para medição do coeficiente de absorção sonora.

3.1 Fabricação das amostras e planejamento experimental

Os corpos de prova foram fabricados em PLA por FDM, utilizando bico e largura de extrusão de 0,4 mm, altura de camada de 0,2 mm, temperatura do bico e mesa de 200 °C e 55 °C, respectivamente. O

modelo foi um cilindro de 30 mm de diâmetro e inicialmente com 25 mm de altura. Paredes e camadas de topo e base foram removidas, de modo que a peça fosse constituída somente pelo preenchimento.

Na Etapa 1 dos ensaios, foram impressas nove amostras de 25 mm, combinando três padrões, Gyroid, TPMS-D e TPMS-FK, com três porcentagens, 10%, 20% e 30%. A comparação entre esses três padrões foi adotada como triagem inicial. O objetivo não foi esgotar as possibilidades de preenchimento disponíveis, mas verificar se, em baixas porcentagens, haveria diferença suficientemente expressiva para justificar a continuidade da varredura com todos os padrões. Como os resultados de 10%, 20% e 30% apresentaram respostas próximas entre Gyroid, TPMS-D e TPMS-FK, optou-se por prosseguir a investigação com o Gyroid, reduzindo o uso de material, o tempo de impressão e o tempo dos ensaios, e também por ser o tipo de preenchimento mais comum entre eles nos fatiadores.

Nessa etapa, como as peças não possuem parede externa, optou-se por desativar o parâmetro “Infill Anchor” - que conecta os pontos de preenchimento das extremidades por meio de um segmento para melhor fixação no que seriam as paredes [9] - a fim de manter uma maior uniformidade em toda a peça, já que, na ausência de paredes, sua presença causava acabamento visual e deposição irregular. Após a triagem, observou-se que as amostras sem essa ancoragem apresentavam diâmetro ligeiramente menor, dificultando o posicionamento e o ajuste no tubo ao ficarem soltas. Por esse motivo, nas etapas seguintes, o parâmetro de ancoragem do preenchimento foi reativado, melhorando o contato entre o corpo de prova e a parede interna do tubo. Em razão dessa alteração de fabricação e montagem, a Etapa 1 e as posteriores foram analisadas separadamente. As amostras estão presentes na Figura 3.

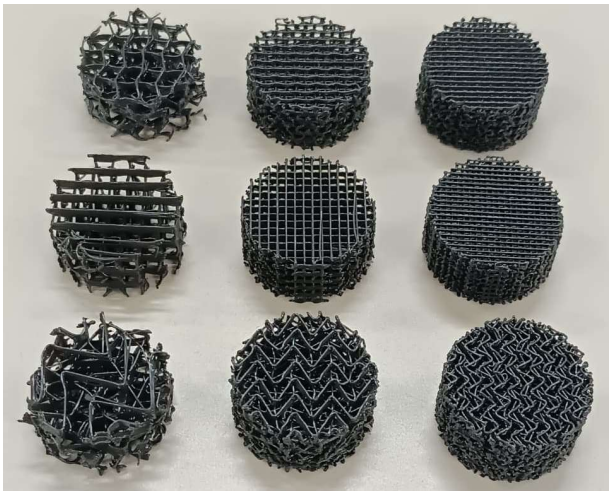


Figura 3: Nove corpos de prova da Etapa 1, com três padrões e três porcentagens, fabricados sem *infill anchor*. De cima para baixo: Gyroid, TPMS-D e TPMS-FK. Da esquerda para direita: 10% , 20% , 30%.

Na Etapa 2, foi realizada uma varredura do padrão Gyroid em 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 99,99%, com altura de 25 mm. A condição de 99,99% foi o maior valor para preservar a trajetória Gyroid no fatiador. Uma amostra de 100% também foi medida, mas nessa condição o fatiador substitui automaticamente o padrão por preenchimento concêntrico, razão pela qual ela foi tratada como referência adicional de peça considerada maciça. As amostras são apresentadas na Figura 4.



Figura 4: Amostras de 10 a 99,99% Gyroid com *infill anchor*, em ordem crescente, além da amostra maciça.

Na Etapa 3, foram fabricadas amostras Gyroid de 50 mm nas porcentagens de 70%, 80% e 90%, a faixa com os melhores resultados, visíveis na Figura 5. As configurações de 75 mm foram obtidas pela associação axial das amostras de 50 mm com as respectivas amostras de 25 mm. Essa solução adiciona uma interface de contato entre os corpos de prova, mas permite avaliar o efeito do aumento de espessura. As etapas estão indicadas na Tabela 1.

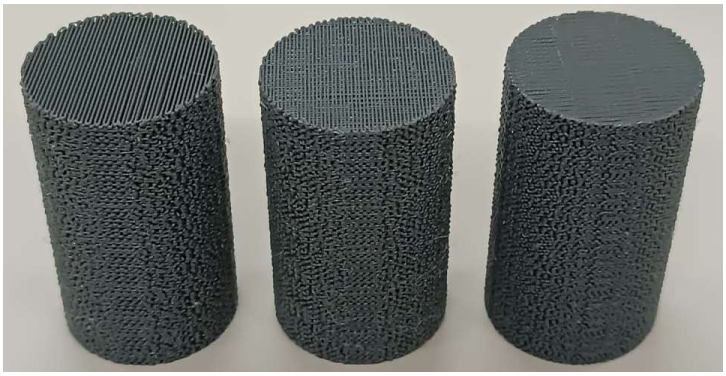


Figura 5: Amostras Gyroid de 50 mm com 70%, 80% e 90%, da esquerda para a direita.

Tabela 1: Planejamento experimental das amostras analisadas.

Etapa	Padrão	Porcentagens de preenchimento	Altura/configuração
1	Gyroid, TPMS-D e TPMS-FK	10%, 20% e 30%	25 mm
2	Gyroid	10% a 90% em passos de 10%, e 99,99%	25 mm
3	Gyroid	70%, 80% e 90%	25 mm; 50 mm; 75 mm (50 + 25 mm)

3.2 Aparato experimental e tratamento dos dados

O coeficiente de absorção sonora em incidência normal foi determinado pelo método da função de transferência com dois microfones, conforme a ASTM E1050 [8]. O tubo de impedância utilizado possui diâmetro interno de 30 mm e foi adotado espaçamento entre microfones de 30 mm. A instrumentação foi configurada com dois microfones de pressão PCB 377A21, de sensibilidade 48 mV/Pa, gerador de sinais *Power Amplifier Brüel & Kjær Type* 2734, amplificador de sinais Leác's CA500 e módulo de aquisição dinâmica NI 9234.

As amostras foram posicionadas à frente de dois tarugos de cobre que constituíram a terminação reflexiva. Também foi realizada medição apenas com essa terminação, sem amostra, para caracterizar a resposta residual do conjunto. Para o espaçamento entre microfones e o diâmetro do tubo utilizados, os limites de frequência calculados pela norma foram aproximadamente 114,3 Hz e 4573,3 Hz, conforme os critérios geométricos do método de tubo de impedância [8]. Assim, adotou-se a faixa de 200 a 4000 Hz, mantendo certa margem em relação aos limites operacionais de aquisição.

A Figura 6 apresenta o conjunto experimental. A amostra é posicionada na extremidade oposta à fonte sonora, em contato com a terminação rígida. A análise feita considerou a curva média pontual obtida a partir de três repetições de medição por condição. Essas repetições caracterizam a repetibilidade instrumental e de remontagem, e não a variabilidade entre corpos de prova independentes; por isso, não foram realizadas inferências estatísticas de significância entre condições. Ressalta-se que a Figura 6 ilustra apenas o aparato experimental, a amostra montada na fotografia corresponde ao silenciador metamaterial, e não ao corpo de prova abordado neste artigo.

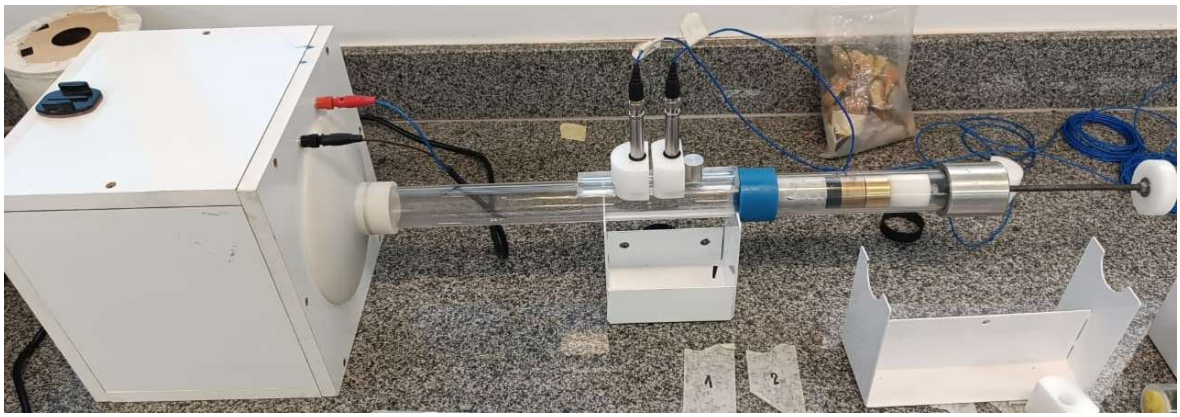


Figura 6: Aparato experimental empregado nos ensaios de absorção sonora em tubo de impedância.

4. Resultados e discussão

Os resultados de cada uma das etapas serão apresentados separadamente, além da discussão das limitações experimentais.

4.1 Etapa 1 - Triagem dos tipos de preenchimento

A Figura 7 compara os padrões Gyroid, TPMS-D e TPMS-FK em 10%, 20% e 30% de preenchimento. Em cada porcentagem, as respostas permaneceram próximas ao longo da faixa, sem alterações expressivas na forma geral da resposta. A Tabela 2 apresenta essa tendência: em 10%, os coeficientes médios variaram de 0,189 a 0,193; em 20%, de 0,214 a 0,222; e em 30%, de 0,257 a 0,267. As diferenças máximas entre os padrões foram, respectivamente, 0,004, 0,008 e 0,010, valores da mesma ordem de grandeza dos desvios-padrão associados às repetições de medição. O aumento da porcentagem, por outro lado, elevou progressivamente a absorção, especialmente acima de 1500 Hz.

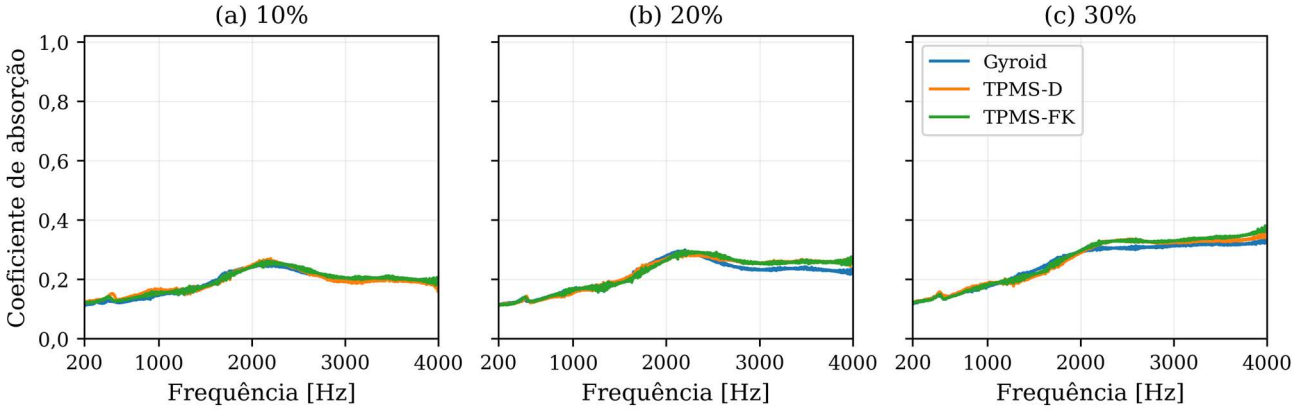


Figura 7: Coeficiente de absorção médio dos três tipos de preenchimento em (a) 10%, (b) 20% e (c) 30%, para amostras de 25 mm fabricadas sem infill anchor.

Tabela 2: Coeficiente médio de 200-4000 Hz na triagem (média ± desvio-padrão).

Porcentagem	Gyroid	TPMS-D	TPMS-FK	Diferença máxima
10%	0,189 ± 0,006	0,191 ± 0,001	0,193 ± 0,005	0,004
20%	0,214 ± 0,005	0,221 ± 0,006	0,222 ± 0,004	0,008
30%	0,257 ± 0,009	0,263 ± 0,002	0,267 ± 0,001	0,010

Essa constatação não deve ser interpretada como prova estatística de equivalência entre padrões, uma vez que não foram fabricadas réplicas físicas independentes. Ainda assim, devido à proximidade das respostas entre os padrões em uma mesma porcentagem em conjunto com a pequena magnitude das diferenças em relação à dispersão experimental observada e da necessidade de reduzir o número de corpos de prova, optou-se por prosseguir com o Gyroid nas etapas seguintes. Uma investigação complementar, comparando diferentes padrões ao longo de uma faixa mais ampla de porcentagens de preenchimento, ainda seria necessária para avaliar se essa proximidade se mantém no restante da faixa.

4.2 Etapa 2 - Varredura da porcentagem de preenchimento Gyroid

A Figura 8 mostra a varredura Gyroid completa, de 10% a 99,99%, juntamente com a terminação rígida e a condição sólida de 100%. As amostras com menores porcentagens de preenchimento apresentaram absorção crescente com a frequência até uma região ótima entre 60% e 80%, que produziram os maiores valores do coeficiente de absorção, próximo à região de 2500 Hz. O melhor desempenho global ocorreu em 70% e 80%, com a condição de 70% atingindo α máximo próximo de 0,994 em 2716 Hz, enquanto 80% atingiu 0,944 em 2488 Hz.

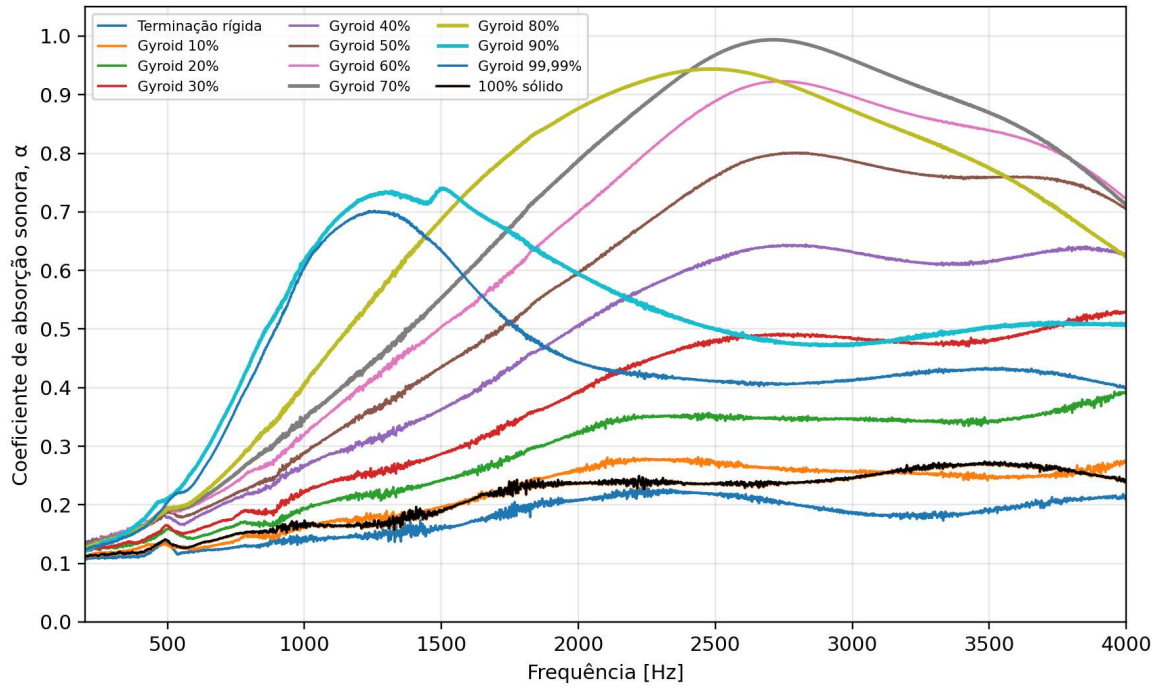


Figura 8: Varredura de preenchimento Gyroid em amostras de 25 mm entre 10% e 99,99%, terminação rígida e referência de 100% concêntrica.

A partir de 90%, observa-se mudança qualitativa da resposta. A curva passou a apresentar maior contribuição relativa em frequências mais baixas, com pico em 1504 Hz. A condição de 99,99% manteve essa tendência, com pico em 1257 Hz, porém com menor absorção global. A amostra 100% não foi analisada como continuidade da curva Gyroid, pois o fatiador alterou o preenchimento para concêntrico. Seu comportamento se aproximou mais da terminação rígida, ou seja, a amostra considerada maciça e sem poros atuou praticamente de forma reflexiva como o tarugo de cobre.

O mapa espectral da Figura 9 complementa a leitura por bandas completas de 1/3 de oitava. As cores indicam o coeficiente médio em cada banda, de zero a um. Observa-se que o crescimento do preenchimento desloca e intensifica as regiões de maior absorção: as condições de 60%, 70% e 80% concentram os maiores valores nas bandas entre aproximadamente 2000 e 3150 Hz, enquanto 90% e 99,99% apresentam maiores valores na banda de 1250 Hz.

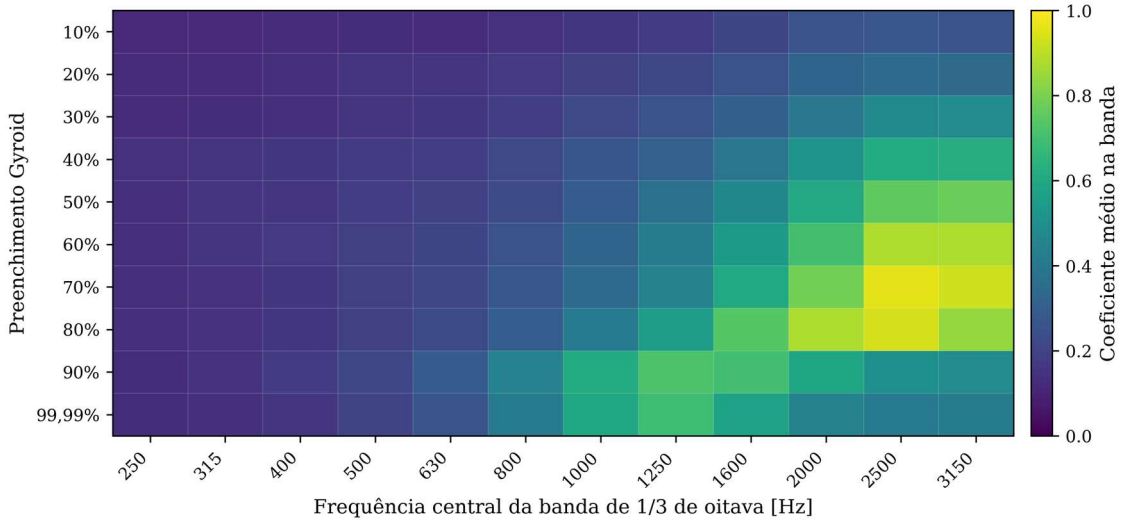


Figura 9: Mapa espectral do coeficiente médio em bandas completas de 1/3 de oitava para a varredura Gyroid de 10% a 99,99%, 25 mm.

A Figura 10 sintetiza a etapa 2 por meio do coeficiente médio da faixa de medição. O índice cresce de forma quase linear até 70%, com média de 0,664, alcançando uma média máxima de 0,668 em 80%. Em 90%, o índice cai para 0,511; em 99,99%, para 0,439. A referência de 100% concêntrico alcançou média de 0,208, próxima à resposta residual da terminação rígida, de 0,177.

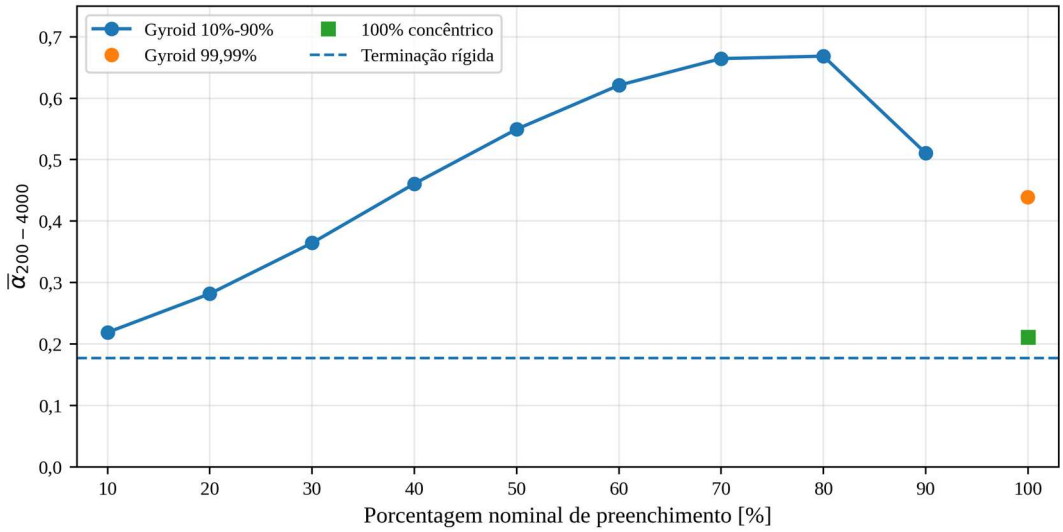


Figura 10: Absorção média de banda larga em função da porcentagem de preenchimento Gyroid, 25 mm.

Fisicamente, esse resultado é compatível com a existência de uma faixa ótima intermediária. Em baixas porcentagens, a estrutura apresenta canais mais abertos e menor área superficial efetiva para interação dissipativa. Em percentuais muito altos, contudo, a estrutura tende a bloquear a propagação no interior do preenchimento e aumentar a reflexão, reduzindo a absorção média [2, 6, 7].

4.3 Etapa 3 - Influência da altura da amostra

A Figura 11 apresenta o efeito da altura nas porcentagens de 70%, 80% e 90%. Em todos os casos, o aumento da espessura deslocou o primeiro máximo principal para frequências menores. Para 70%, a frequência passou de aproximadamente 2716 Hz em 25 mm para 1286 Hz em 50 mm e 825 Hz em 75 mm. Para 80%, o deslocamento foi de 2488 Hz para 1111 Hz e 719 Hz. Para 90%, o primeiro máximo

principal deslocou-se para aproximadamente 1297 Hz, 688 Hz e 504 Hz. Esse deslocamento é coerente com o aumento do caminho acústico efetivo dentro da estrutura [2, 7].

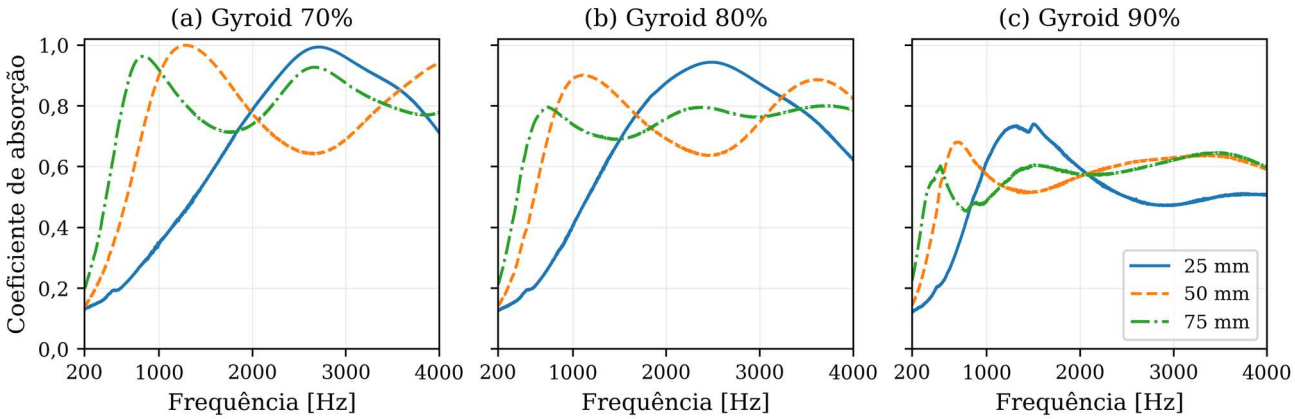


Figura 11: Efeito da altura nas amostras Gyroid de (a) 70%, (b) 80% e (c) 90%. As curvas de 75 mm correspondem à associação de corpos de prova de 50 e 25 mm.

Além do deslocamento espectral, houve certo ganho de absorção média na faixa total. O ganho foi mais expressivo em 70%, de 0,664 para 0,788. Na subfaixa de 200-500 Hz, a evolução foi ainda mais clara: 0,156 para 0,379 em 70%, 0,153 para 0,422 em 80% e 0,159 para 0,457 em 90%. Assim, mesmo quando o índice total apresentou ganho pequeno, a redistribuição da absorção para a região de baixas frequências foi substancial. A Tabela 3 e as Figuras 12 e 13 sintetizam os resultados, tanto em terços de oitava quanto na banda total, além dos pontos máximos.

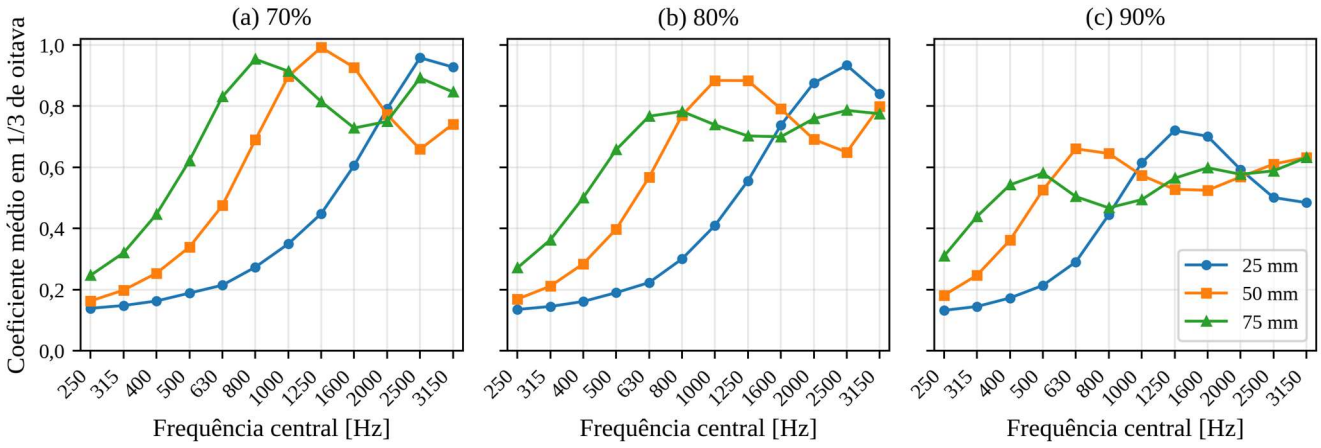


Figura 12: Absorção média em bandas de 1/3 de oitava, 70%, 80% e 90% nas três alturas.

Tabela 3: Métricas das amostras selecionadas em função da altura.

Condição	$\bar{\alpha}_{200-4000}$	$\bar{\alpha}_{200-500}$	Primeiro pico (Hz)	α no pico
70% - 25 mm	0,664 ± 0,001	0,156	2716	0,994
70% - 50 mm	0,739 ± 0,003	0,224	1286	1,000
70% - 75 mm	0,788 ± 0,000	0,379	825	0,963
80% - 25 mm	0,668 ± 0,000	0,153	2488	0,944
80% - 50 mm	0,723 ± 0,001	0,247	1111	0,901
80% - 75 mm	0,733 ± 0,001	0,422	719	0,797
90% - 25 mm	0,511 ± 0,002	0,159	1297	0,734
90% - 50 mm	0,572 ± 0,004	0,302	688	0,681
90% - 75 mm	0,574 ± 0,002	0,457	504	0,603

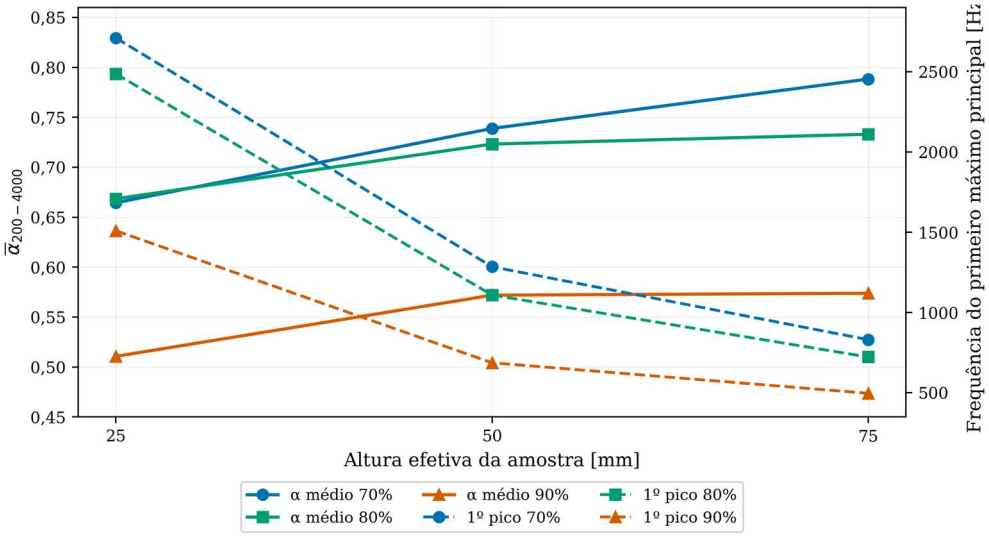


Figura 13: Coeficiente médio de banda larga e frequência do primeiro máximo em função da altura para Gyroid 70%, 80% e 90%. As curvas contínuas usam o eixo esquerdo; as curvas tracejadas usam o eixo direito.

Do ponto de vista da dissertação, a escolha de 70%, 80% e 90% foi coerente com duas necessidades distintas. As condições de 70% e 80% representaram a melhor faixa global de absorção, enquanto a condição de 90%, embora tenha apresentado queda na média de banda larga, deslocou sua região de maior absorção para frequências mais baixas. Esse comportamento é potencialmente interessante para o módulo dissipativo em um silenciador metamaterial voltado a baixas frequências.

4.4 Limitações experimentais

A principal limitação está na ausência de réplicas físicas independentes. Cada condição foi representada por um corpo de prova, medido três vezes, o que permite avaliar a repetibilidade de medição, mas não a variabilidade de fabricação. Portanto, as comparações devem ser interpretadas como tendências experimentais descritivas.

Outra limitação é a mudança do parâmetro *infill anchor* de ancoragem do preenchimento entre a triagem e a varredura. Essa alteração foi necessária para melhorar o ajuste das amostras no tubo, mas impede tratar as amostras Gyroid de 10%, 20% e 30% das duas etapas como equivalentes diretas. Além disso, as configurações de 75 mm foram obtidas pela associação axial de duas amostras, o que introduz uma interface geométrica não existente em um corpo inteiriço.

Por fim, a porcentagem nominal de preenchimento foi utilizada como variável de controle do fatiador, sem medição independente de outros parâmetros como a massa do corpo de prova; essa distinção é importante porque o percentual configurado no fatiador não necessariamente equivale à fração volumétrica real do corpo impresso [7, 9]. Essas propriedades poderão ser avaliadas em etapas futuras para relacionar com maior precisão a geometria fabricada aos mecanismos físicos de absorção.

5. Conclusões

Foi realizada uma investigação experimental de amostras cilíndricas de PLA fabricadas por FDM exclusivamente com preenchimento interno. Na triagem com Gyroid, TPMS-D e TPMS-FK entre 10% e 30%, não foi possível observar uma diferença relevante entre os padrões, que apresentaram valores de diferença da absorção média na mesma ordem de grandeza dos desvios-padrão associados às repetições de medição.

Na varredura Gyroid de 10% a 99,99%, a absorção média global aumentou até uma faixa ótima entre 60% e 80%, com máximos em 70% e 80%. A partir de 90%, houve redução da absorção média e

alteração qualitativa da curva, com deslocamento da resposta para frequências menores. A amostra de 100%, impressa com trajetória concêntrica, comportou-se mais como referência rígida do que como absorvedor poroso, com alta reflexão.

O aumento da altura de 25 para 75 mm elevou a absorção média e deslocou o primeiro máximo principal para frequências mais baixas em todas as porcentagens avaliadas. Esse resultado é relevante para o objetivo maior da pesquisa, pois sugere potencial para que o módulo poroso impresso complemente silenciadores metamateriais ultra-abertos em faixas de menor frequência, associando mecanismos dissipativos a estruturas ressonantes.

Como trabalhos futuros, recomenda-se fabricar réplicas independentes para quantificar a variabilidade do processo, avaliar amostras contínuas de 75 mm, testar a aplicação do módulo de preenchimento em geometria anelar e investigar sua interação com o silenciador metamaterial em ensaios de perda de transmissão sonora.

6. Agradecimentos e declaração de uso de IAG

Agradece-se ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro. Foi utilizada a ferramenta ChatGPT como apoio à organização do texto, ao tratamento dos dados e à geração de códigos para os gráficos; a verificação dos resultados, a interpretação e a responsabilidade pelo conteúdo permanecem com os autores.

Referências

1. BISTAFA, S. R. Acústica aplicada ao controle de ruído. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011. ISBN: 978-85-212-0581-4.

2. ALLARD, J. F.; ATALLA, N. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials. 2. ed. Chichester: Wiley, 2009. ISBN: 978-0-470-74661-5.

3. GAO, N. et al. Acoustic metamaterials for noise reduction: a review. Advanced Materials Technologies, v. 7, 2022, 2100698. Disponível em: https://doi.org/10.1002/admt.202100698.

4. COMANDINI, G. et al. Architected acoustic metamaterials: an integrated design perspective. Applied Physics Reviews, v. 12, 2025, 011340. Disponível em: https://doi.org/10.1063/5.0230888.

5. FAN, J. et al. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends. Materials Today, v. 50, p. 303-328, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.04.019.

6. SHEN, W.; JIANG, X.; QIN, H. Acoustic absorption performance investigation in standard and custom infill patterns for FFF 3D printing with PLA material. Manufacturing Letters, v. 44, p. 1113-1122, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2025.06.131.

7. GODAKAWELA, J.; LOMTE, A.; SHARMA, B. Sound absorption in uniform and layered gyroid and diamond triply periodic minimal surface porous absorbers. Applied Acoustics, v. 236, 110761, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110761.

8. ASTM INTERNATIONAL. ASTM E1050-19: standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system. West Conshohocken, 2019.

9. ORCASLICER. Strength settings: patterns. OrcaSlicer Wiki, 2026. Disponível em: https://github.com/OrcaSlicer/OrcaSlicer/wiki/strength_settings_patterns. Acesso em: 11 jul. 2026.

10. GHAFFARIVARDAVAGH, R. et al. Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference. Physical Review B, v. 99, 024302, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.024302.