

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Desempenho de um metamaterial absorvedor acústico com diferentes perfurações manufaturado pela técnica de corte a laser e camadas justapostas

Cassettari, I.¹; Vergara, E. F.¹; Almeida, G. N.¹; Barbosa, L. R.¹; Mikulski, R. Z.¹; Farias, L. C. B.¹

¹ Laboratório de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, icassettari@hotmail.com

Resumo

O presente estudo investiga o desempenho de um metamaterial acústico labiríntico (MMAL) com perfurações arbitrárias manufaturado pela técnica de corte a laser utilizando um equipamento de comando numérico computadorizado (CNC). Neste sentido, o objetivo é desenvolver absorvedores sonoros com baixo custo de produção e absorção sonora máxima. A metodologia de fabricação consiste no corte das camadas do material escolhido seguida da colagem para construção final do MMAL. Modelos analíticos do absorvedor com perfurações do tipo fenda, circular e quadrada foram utilizados. Apesar de o coeficiente de absorção sonora do absorvedor ser sensível às variações das dimensões das aberturas, dimensões ótimas foram calculadas. Para validar o método construtivo, amostras com perfurações cilíndricas, quadrada e do tipo fenda com distintas profundidades (2,9 mm e 5,8 mm) cada e sintonizadas em 270 Hz foram construídas em MDF (Medium Density Fiberboard) e avaliadas em um aparato de tubo de impedância. Resultados experimentais demonstram boa concordância com os modelos analíticos obtendo erro máximo de 8 Hz além de ratificar a utilização da técnica proposta na construção dos MMAL. Para construir todas as amostras ensaiadas foi investido cerca de 7% do valor para construção do mesmo conjunto aplicando a tecnologia de impressão 3D pela técnica de extrusão de material ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene). Os resultados indicam que um MMAL construído pelo corte a laser tem desempenho próximo aos fabricados com impressão 3D. Dessa forma o emprego desta técnica apresenta-se promissora, principalmente por permitir a construção de MMAL em grande escala e baixo custo.

Palavras-chave: Absorção sonora, Cortes a laser, Metamaterial acústico, Camadas justapostas.

PACS: 43.50.Gf, 43.55.Ev, 43.58.Bh, 43.20.Mv.

Performance of an acoustic absorbing metamaterial with different perforations manufactured by laser cutting technique and juxtaposed layers

Abstract

The present study investigates the performance of a labyrinthine acoustic metamaterial (LAMM) with arbitrary perforations manufactured by the laser cutting technique using computer numerical control (CNC) equipment. In this sense, the objective is to develop sound absorbers with low production cost and maximum sound absorption. The manufacturing methodology consists of cutting the layers of the selected material followed by gluing for the final construction of the LAMM. Analytical models of the absorber with different types of perforations (slit, circular and square) were used. Optimal dimensions were calculated despite the sound absorption coefficient of the absorber being sensitive to variations in the dimensions of the openings. To validate the constructive method, samples with cylindrical, square and slit-type perforations with different depths (2.9 mm and 5.8 mm) each and tuned to 270 Hz were built in MDF (Medium Density Fiberboard) and evaluated in an apparatus of impedance tube. Experimental results demonstrate good agreement with the analytical models, obtaining a maximum error of 8 Hz, in addition to confirming the use of the proposed technique in the construction of the LAMM. To manufacture all tested samples, about 7% of the value was invested to build the same set by applying 3D printing technology using the extrusion technique of ABS material (Acrylonitrile Butadiene Styrene). The results indicate that an LAMM manufactured by laser cutting has a performance close to those made with 3D printing. Thus, the use of this technique is promising, mainly because it allows the construction of LAMM on a large scale and at low cost.

Keywords: Sound absorption, Laser cutting, Acoustic metamaterial, Juxtaposed layers.



1. INTRODUÇÃO

Em diversas situações do cotidiano, o tratamento acústico pode ser realizado por meio da aplicação dos tradicionais painéis acústicos, os mesmos são baseados no fenômeno da ressonância acústica. Entretanto, dependendo do volume da cavidade de ar estes absorvedores apresentam baixa eficiência de absorção em baixas frequências, bem como na difusão de ondas sonoras [1, 2]. Nesta perspectiva, para aumentar o desempenho da absorção em baixas frequências existem alguns desafios como reduzir as dimensões da estrutura dos absorvedores e ao mesmo tempo galgar uma equivalência entre sua impedância de superfície e a impedância do meio [1, 3].

Os metamateriais acústicos (MMA) podem superar estes desafios. Os MMA são estruturas desenvolvidas não encontradas na natureza e que tem revolucionado o atual campo da acústica por permitir agregar características novas aos materiais acústicos, por exemplo propriedades e comportamentos específicos para grandes comprimentos de onda [4–6].

São vários os tipos das estruturas geométricas dos MMA propostos e diversas são as aplicações, desde perda de transmissão (PT), absorção sonora, difusão sonora, entre outras [5, 6]. Grande parte das geometrias desenvolvidas são materializadas por meio da tecnologia de impressão 3D, testadas e validadas no aparato tubo de impedância [7–12]. Essa tecnologia é uma solução ótima para fabricação de protótipos em baixa escala, porém, não muito viável para a produção em alta escala devido ao alto custo financeiro, bem como na construção de estruturas absorvedoras para aplicações práticas comerciais.

Neste sentido, uma alternativa é a utilização da tecnologia de corte a laser, uma vez que a mesma é frequentemente utilizada para fabricação de outros tipos de metamateriais, entre eles os metamateriais mecânicos [13–19], elásticos [4] e eletromagnéticos [20, 21]. Embora esta tecnologia seja utilizada para fabricação de outros tipos de metamateriais, a mesma ainda é pouco explorada e aplicada aos MMA. Desta forma, o presente estudo pretende investigar o uso da tecnologia de corte a laser e propor uma metodologia para construção e validação de um metamaterial acús-

tico labiríntico (MMAL) com perfurações arbitrárias. O desempenho de absorção sonora em baixas frequências (< 600 Hz) do absorvedor é explorado. Por fim, os resultados experimentais obtidos no tubo de impedância apresentam boa concordância com as previsões teóricas e numérica utilizando o método dos elementos finitos (MEF).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 ilustra a estrutura do MMAL composta de $n = 2$ espaços enrolados e a tampa configurada com três tipos de perfurações distintas: circular, quadrada e fenda. Os parâmetros geométricos do modelo estão elencados na legenda da figura. Pode-se observar que a distinção do modelo se dá somente a partir do tipo de perfuração em questão, com os demais parâmetros sendo os mesmos.

2.1 Modelo analítico

O coeficiente de absorção sonora (α) do MMAL pode ser determinado por

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s/Z_0 - 1}{Z_s/Z_0 + 1} \right|^2, \quad (1)$$

onde Z_s é a impedância de superfície total e Z_0 a impedância do ar. Considerando que a superfície do painel é suficientemente rígida e desprezando os efeitos vibroacústicos, a impedância de superfície total Z_s pode ser obtida pela soma da impedância da cavidade Z_c com a impedância do painel perfurado Z_p , a qual é dada por [22, 23]

$$Z_s = Z_p + Z_c. \quad (2)$$

A impedância da cavidade de espaço enrolado é calculada por

$$Z_c = -j \frac{S_0}{S_i} Z_e^c \cot(k_{eq} l_{eff}), \quad (3)$$

com $S_0 = m \times L$ e $S_i = a \times w$ representando respectivamente as seções transversal da célula unitária e do espaço enrolado. $l_{eff} = n \times \sqrt{w^2 + (L - b_o)^2}$ é o comprimento efetivo de propagação interno e $k_{eq} = w \sqrt{\rho_{eq} C_{eq}}$ é a constante de propagação efetiva [22]. $Z_e^c = \sqrt{\rho_{eq} / C_{eq}}$ representa a impedância característica dos espaços

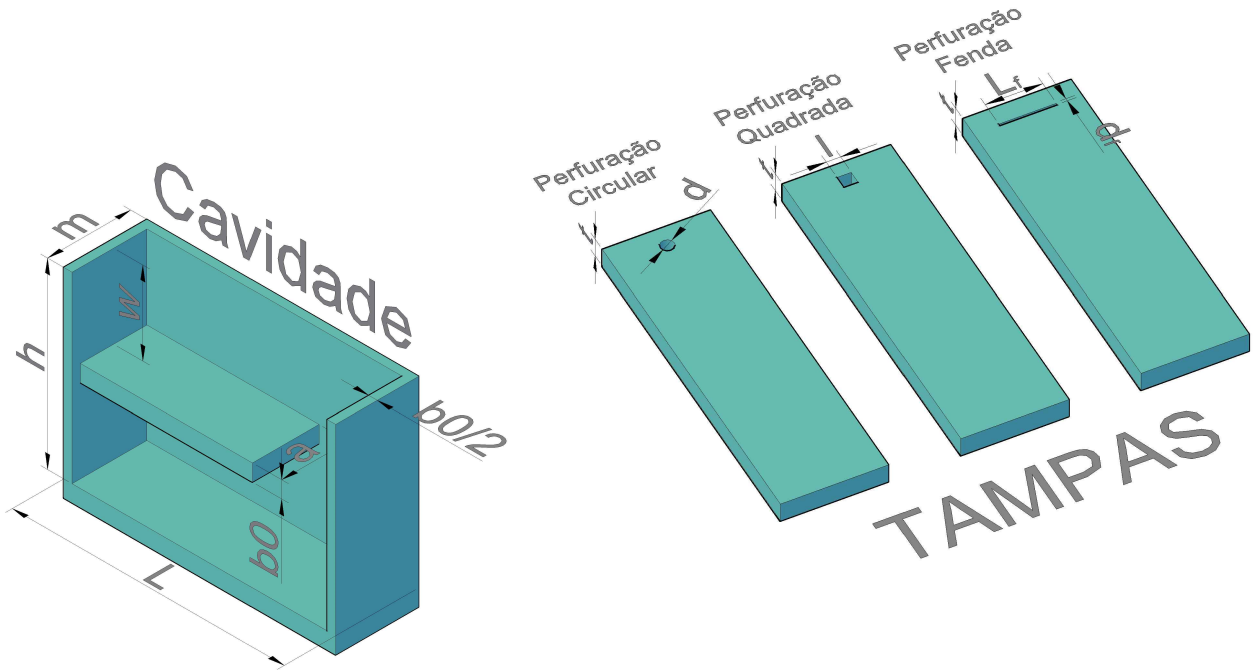


Figura 1: Cavidade com $n = 2$ espaços enrolados e a tampa com distintas perfurações. Os parâmetros geométricos considerados no modelo são: a espessura do painel e da cavidade labiríntica t e h , respectivamente. O comprimento da célula unitária L , a largura da célula m , a espessura das paredes internas b_o , a altura do espaço enrola w e sua largura a . Por fim, o diâmetro d da perfuração circular, os lados l da perfuração quadrada e a largura L_f e altura d_f da fenda.

enrolados. (ρ_{eq}) e (C_{eq}) representam a densidade e compressibilidade complexa dependentes da frequência, as quais são obtidas respectivamente por [24]

$$\rho_{eq} = \rho_0 \frac{va^2w^2}{4iw} \times \left[\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [\alpha_k^2 \beta_n^2 \times \left(\alpha_k^2 + \beta_n^2 + \frac{i\omega}{v} \right)]^{-1} \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$C_{eq} = \frac{1}{P_0} \left\{ 1 - \frac{4i\omega(\gamma-1)}{v'a^2w^2} \times \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [\alpha_k^2 \beta_n^2 \times \left(\alpha_k^2 + \beta_n^2 + \frac{i\omega\gamma}{v'} \right)]^{-1} \right\}, \quad (5)$$

na qual $P_0 = 101325$ Pa e $\gamma = 1,41$ representam a pressão do ar e a razão do calor específico, respectivamente. $\alpha_k = (k+1/2)\pi/a$ e $\beta_n = (n+1/2)\pi/w$ são constantes, os parâmetros $v = \mu/\rho_0$ e $v' = \kappa/\rho_0 C_v$ são calculados a partir

da viscosidade do ar ($\mu = 1,8134 \times 10^{-5}$ Pa.s), condutividade térmica ($\kappa = 0,026$ W/(m.K)) e calor específico a volume constante ($C_v = 0,712$ kJ/(kg.K)) [22, 23].

2.1.1 Impedância do painel com perfuração circular

A partir da solução da equação da onda em tubos circulares proposto por Lord Rayleigh [25], resolvida para tubos curtos por Crandall [26] e amplamente estudada por Maa [27, 28], a impedância do painel com perfuração circular é determinado por

$$Z_{pc} = \frac{j\omega\rho_0 t}{\Theta} \left[1 - \frac{2J_1(\Gamma\sqrt{-j})}{\Gamma\sqrt{-j}J_0(\Gamma\sqrt{-j})} \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2}\eta\Gamma}{\Theta d} + \frac{j0,85\omega\rho_0 d}{\Theta F(\epsilon)}, \quad (6)$$

onde J_0 e J_1 são respectivamente as funções de Bessel de primeira classe de ordem zero e um, $\Gamma = d\sqrt{\frac{\rho_0\omega}{4\eta}}$ é a constante de perfuração e $\Theta = NA_f/S_0$ a porosidade, com A_f representando a área da perfuração e N o número de perfurações.



Os últimos termos da Equação (6) representam as parcelas resistiva e reativa de correção da impedância do painel, a primeira devido ao atrito do fluxo de ar na camada limite viscosa e a segunda devido a radiação de ar em ambas extremidade da perfuração, com $F(\varepsilon) = [1 - 1,4\varepsilon + 0,338\varepsilon^3 + \dots]^{-1}$ representando a função de Fok.

2.1.2 Impedância do painel com perfuração quadrada

A abordagem do método de fluido equivalente modificada é adotada para descrever a impedância do painel com perfuração quadrada, a mesma é dada por

$$Z_{pq} = \frac{j\omega\rho_e t}{\varepsilon} + \frac{\alpha 2R_s}{\varepsilon} + \frac{j\omega\rho_0\delta}{\varepsilon}, \quad (7)$$

em que ε é a taxa de perfuração, t é a espessura do painel e $\delta = 0,85l \left(1 - 1,33\varepsilon^{1/2} - 0,07\varepsilon + 0,40\varepsilon^{3/2}\right)$ é um termo de correção. A correção resistiva final é $R_s = \sqrt{2\eta\rho_0\omega}/2$ [29]. ρ_e é densidade efetiva complexa da perfuração, a qual é dada por

$$\rho_e = \rho_0 \left(1 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\rho_0} \left[\frac{-\frac{s}{4}\sqrt{-j} \frac{J_1(s\sqrt{-j})}{J_0(s\sqrt{-j})}}{1 - \frac{2}{s\sqrt{-j}} \frac{J_1(s\sqrt{-j})}{J_0(s\sqrt{-j})}} \right] \right), \quad (8)$$

sendo a resistividade do fluxo para perfuração quadrada dada por $\sigma\phi = 7\eta/r^{-2}$, o raio hidráulico é $\bar{r} = 2S/P$, com S representando a área da seção transversal da perfuração e P o seu perímetro. Por fim, o parâmetro s é dado por

$$s = c\sqrt{\frac{8\omega\rho_0}{\sigma\phi}}, \quad (9)$$

em que $c = \sqrt{8\eta/\sigma\phi}/\bar{r}$ representa o fator de forma da perfuração quadrada.

2.1.3 Impedância do painel com perfuração fenda

Assumindo que o parâmetro $L_f \gg d_f$, a impedância de um painel com perfuração do tipo fenda e suas respectivas correções é dada por [11]

$$Z_{pf} = \frac{j\omega\rho_0 t}{\Theta} \left[1 - \frac{\tanh(\sigma\sqrt{j})}{\sigma\sqrt{j}} \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2\rho_0\eta\omega}}{2\Theta} + j\omega\rho_0 \frac{F_e d_f}{2F(\varepsilon)\Theta}, \quad (10)$$

em que $\sigma = d_f \sqrt{\rho_0\omega/4\eta}$ é a constante de perfuração e F_e denota a integral elíptica completa, em que uma elipse de forma apropriada se aproxima de uma fenda, essa integral é dada por

$$F_e = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta}}, \quad (11)$$

com $e = \sqrt{1 - (d_f/2L_f)^2}$ representando a excentricidade de uma elipse.

2.2 Modelo numérico

Uma simulação numérica do MMAL foi realizada utilizando o *software* comercial COMSOL *Multiphysics*. No modelo uma simulação completa foi realizada pela interação entre os módulos Acústico-Thermoacústico no domínio da frequência. A Figura 2 ilustra a geometria de um tubo de impedância acoplado a uma célula do MMAL usado na simulação de um experimento virtual. A condição de radiação de ondas planas com amplitude de 1 Pa foi aplicada em uma extremidade do tubo.

A malha foi construída utilizando elementos do tipo tetraédricos com o tamanho dos elementos obedecendo um número mínimo de 9 elementos por comprimento de onda. Por fim, admite-se a hipótese que não existe interação fluido-estrutura,

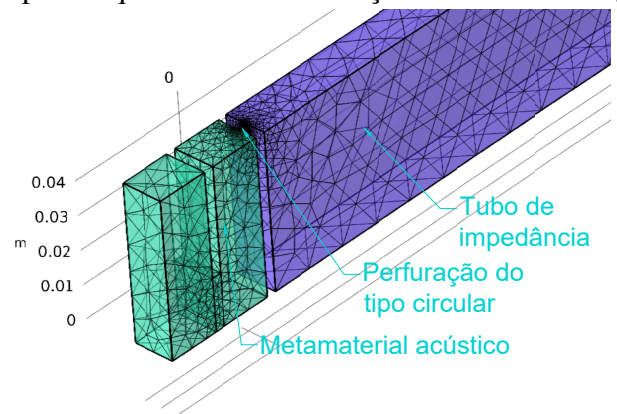


Figura 2: Modelo numérico construído no *software* COMSOL.

pois todas as paredes são consideradas corpos rígidos perfeitos.

2.3 Aparato experimental

O coeficiente de absorção sonora de distintas amostras e configurações do MMAL foi determinado utilizando um aparato de tubo de impedância com diâmetro interno de 107 mm. Uma configuração experimental baseada no método padrão de dois microfones foi adotado [30]. A Figura 3 ilustra a cadeia de instrumentos e sinais usados na caracterização experimental, com $X2$ representando a distância entre os microfones e $X1$ a distância entre o microfone A até a amostra.

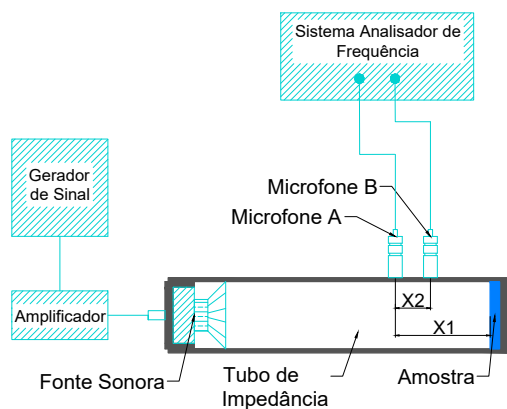


Figura 3: Cadeia de sinal da bancada experimental.

2.4 Corte a laser

A tecnologia de corte a laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) baseia-se na focalização de uma grande densidade de energia num feixe de radiação capaz de vaporizar partes do material desejado. Este processo se enquadra na técnica de construção subtrativa a partir de uma matéria prima. O processo de corte a laser é ilustrado na Figura 4 e se resume em cinco etapas [31]:

- Um feixe de radiação infravermelho por exemplo é gerado por um laser;
- O feixe é focalizado na superfície de corte por meio de uma lente;
- A luz focalizada aquece o local em um ponto gerando fusão do material;
- O material fundido é expulso do local por um jato de gás pressurizado;

- O laser é movido por toda área de corte pelo movimento dos espelhos que são controlados computacionalmente.

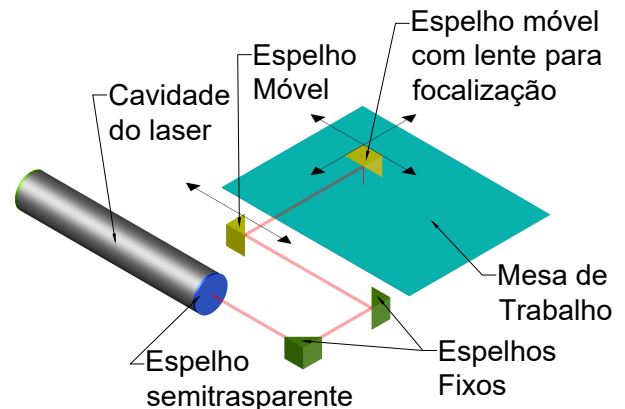


Figura 4: Processo de corte a laser.

2.5 Construção das amostras de MMAL

A metodologia de construção das amostras se divide em quatro etapas:

- O corte a laser de cada camada da cavidade (corpo) do absorvedor utilizando como matéria prima o MDF com espessura de 2,9 mm de espessura;
- O corte a laser do painel (tampa) do absorvedor com o respectivo tipo de perfuração e espessuras, ou seja, 2,9 e 5,8 mm;
- As camadas do corpo são justapostas em série e fixadas com cola branca e duas cavilhas de madeira, garantindo o alinhamento das camadas;
- A tampa que pode ser facilmente trocada é fixada por dois parafusos sextavados.

Importante destacar que entre a tampa e o corpo um anel de vedação de borracha, com espessura de 1 mm que evita vazamento acústico é instalado. Amostras do MMAL com perfuração circular, quadrada e tipo fenda são ilustradas na Figura 5, respectivamente.



(a) Perfuração circular.

(b) Perfuração quadrada.

(c) Perfuração fenda.

Figura 5: Amostras de MMAL produzidas em MDF.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção os resultados do coeficiente de absorção do MMAL são apresentados. As análises decorrem com o intuito de validar tanto a técnica de construção como o próprio absorvedor com os distintos tipos de perfurações.

Seis amostras foram construídas, utilizando o mesmo corpo e variando somente as tampas, ou seja, a mesma cavidade com $n = 2$ espaços enrolados. Os valores dos parâmetros geométricos definidos estão listados no Quadro 1.

Quadro 1: Parâmetros geométricos (em mm) do corpo das amostras de MMAL.

Parâmetro	Valor
m	15,04
h	33,10
b_o	2,90
L	49,10

Os valores dos parâmetros geométricos das tampas com distintas espessuras e distintos tipos de

perfuração estão descritas na Tabela 1.

3.1 Perfuração circular

A Figura 6 mostra os resultados teórico, simulado e experimental do MMAL com distintas espessuras do painel (t). Uma elevada concordância na frequência e amplitude entre os modelos teórico e numérico é observada. Para a amostra C1, o pico de absorção sonora aparece em 270 Hz e 274 Hz, respectivamente. Por outro lado, para a amostra C2 aparece em 267 Hz e 272 Hz, correspondentemente. Além disso, uma absorção sonora experimental em 267 Hz com amplitude de 0,82 para a amostra C1 e 262 Hz com amplitude de 0,68 para C2 é observada.

A fabricação de amostras com este perfil de perfuração exige maior nível de precisão do equipamento que faz o corte, quando comparado com as amostras com perfurações quadrada ou fenda.

Tabela 1: Parâmetros geométricos (em mm) das tampas das amostras.

Amostra / Parâmetro	Perfuração	t	d	l	L_f	d_f
C1	Circular	5,80	2,13	-	-	-
C2	Circular	2,90	1,80	-	-	-
Q3	Quadrado	5,80	-	2,13	-	-
Q4	Quadrado	2,90	-	1,60	-	-
F5	Fenda	5,80	-	-	0,53	8,13
F6	Fenda	2,90	-	-	0,40	5,90

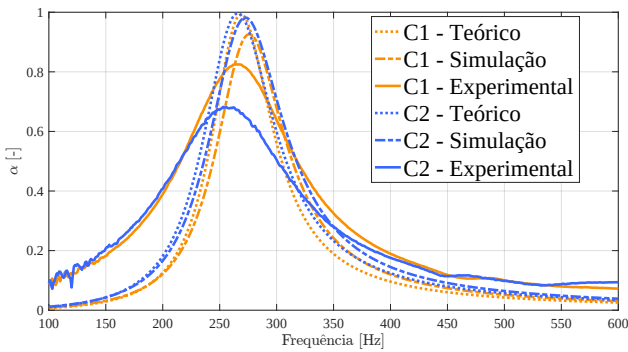


Figura 6: Coeficiente de absorção sonora das amostras com perfuração circular.

3.2 Perfuração quadrada

Os resultados a partir diferentes predições do MMAL com distintas espessuras do painel (t) é mostrado na Figura 7. Existe alta concordância com relação a frequência e amplitude entre os modelos teórico e numérico. Para a amostra Q3, o pico de absorção sonora aparece em 271 Hz e 270 Hz, respectivamente. Por outro lado, para a amostra Q4 aparece em 266 Hz e 264 Hz, correspondentemente. Além disso, uma absorção sonora experimental em 267 Hz com amplitude de 0,77 para a amostra Q3 e 268 Hz com amplitude de 0,72 para Q4 é observada.

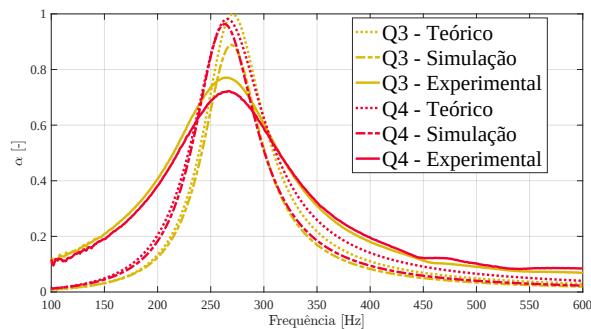


Figura 7: Coeficiente de absorção sonora das amostras com perfuração quadrada.

É importante destacar que a fabricação das amostras com perfuração quadrada é facilitada, uma vez que para o corte de um quadrado o laser movimentada apenas em um eixo de cada vez, não necessitando de elevada precisão para cumprir com qualidade a tarefa.

3.3 Perfuração fenda

A Figura 8 mostra os resultados a partir de distintas predições do MMAL com diferentes espessuras do painel (t). Uma alta concordância na frequência e amplitude entre os modelos teórico e

numérico é observada. Para a amostra F5, o pico de absorção sonora aparece em 275 Hz e 270 Hz, respectivamente. Por outro lado, para a amostra F6 aparece em 273 Hz e 272 Hz, correspondentemente. Uma absorção sonora experimental com menor amplitude é observado neste modelo de perfuração, onde os picos são localizados em 271 Hz com amplitude de 0,59 para a amostra F5 e 270 Hz com amplitude de 0,45 para F6.

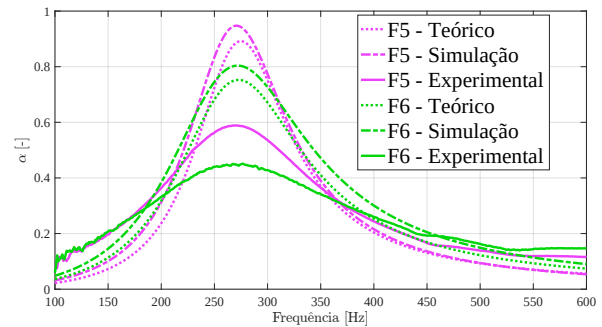


Figura 8: Coeficiente de absorção sonora das amostras com perfuração fenda.

O resultado experimental apresentado acima neste tipo de perfuração se deve a dificuldade de dimensionamento, como o desempenho depende de dois parâmetros, largura da fenda L_f e diâmetro da fenda d_f , não é trivial encontrar o ponto ótimo para a absorção desejada. Além disso, o valor de d_f tende a ser pequeno, próximo do diâmetro do feixe do laser, sendo o mesmo extremamente influente no desempenho final do metamaterial, assim pequenas variações no processo produtivo pode reduzir significativamente o desempenho da amostra.

3.4 Avaliação dos resultados experimentais

Ao comparar os resultados experimentais das amostras com os respectivos resultados teóricos e de simulação (ver Figura 6, Figura 7 e Figura 8), é possível perceber um alargamento da curva de absorção, ou seja, valores maiores de absorção fora da faixa onde ocorre o pico. Este comportamento é consequência da porosidade do material (MDF) utilizado para construção das amostras, propriedade não considerada nos modelos teórico e numérico, isto causa o aumento da absorção sonora dos resultados experimentais para frequências menores de 200 Hz ou maiores de 400 Hz.

Com relação a profundidade de perfuração (t), os maiores valores de absorção sonora (α) fo-

**Tabela 2:** Comparação dos resultados experimentais.

Amostra / Parâmetro	Frequência de Pico [Hz]	Amplitude de α na frequência de pico	Largura de 50% [Hz]
C1	267	0,82	103
C2	262	0,68	86
Q3	267	0,77	100
Q4	268	0,72	96
F5	271	0,59	82
F6	270	0,45	0

ram obtidos para a amostra C1 com perfuração circular e espessura t igual a 5,8 mm, já para espessura t igual a 2,9 mm, o maior valor foi obtido pela amostra Q4 com perfuração quadrada. Dessa forma os dois perfis de perfuração desempenharam com qualidade o objetivo.

Os valores expostos na Tabela 2 indicam que os melhores resultados foram obtidos para as amostras com maior espessura de perfuração t , ou seja, para as amostras C1, Q3 e F5. Com relação a frequência onde ocorreu o pico de absorção, C2 foi a amostra que mais se distanciou do objetivo obtendo pico de absorção para a frequência de 262 Hz, 8 Hz do planejado.

Por fim, outro dado relevante é a largura de banda para 50% de absorção ($\alpha = 0,5$), neste quesito os absorvedores desempenharam largura entre 82 e 103 Hz, com exceção da amostra F6 a qual não atingiu absorção de 50% para o intervalo estudado. Os maiores valores de largura de absorção foram obtidos para as amostras com t igual a 5,8 mm (C1 = 103, Q3 = 100 e F5 = 82), quando comparados com os mesmos perfis de perfuração com menor espessura t igual a 2,9 mm (C2 = 86, Q4 = 96 e F6 = 0).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma proposta para construção de MMAL utilizando a técnica de corte laser como tecnologia de construção. Os resultados experimentais demonstram concordância com os modelos teóricos e simulações computacionais, para os três perfis de perfuração testados. Deste modo, a técnica proposta mostrou-se viável para construção de MMAL, apesar de resultar em valores pico de absorção menores dos valores apresentados nos modelos teórico e numérico, a

técnica permitiu o emprego de material naturalmente poroso, portanto resultou em um adicional de absorção fora da faixa de sintonia do metamaterial.

Por fim, devido ao menor custo com a matéria prima utilizada na construção dos objetos de estudo, além da possibilidade em reutilizar o mesmo corpo das amostras, alterando apenas as tampas, a despesa total necessária para construir os seis metamateriais estudados foi cerca de 7% do valor para manufatura de amostras equivalentes em ABS utilizando a tecnologia de impressão 3D.

5. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada pelo Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina. Os autores E. F. Vergara e G. N. Almeida agradecem o suporte financeiro da CAPES - Brasil (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

REFERÊNCIAS

- [1] Romero-Garcia, V; Jiménez, Noé; Pagneux, Vincent e Groby, Jean-Philippe. Deep sub-wavelength metamaterials for sound absorption for the reflection and ventilation problems. Em *Metamaterials 2019. 13th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena*, 2019.
- [2] Rossing, Thomas D e Rossing, Thomas D. *Springer handbook of acoustics*. New York: Springer, 2014.
- [3] Cox, Trevor e d'Antonio, Peter. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. Boca Raton: Crc Press, 2016.
- [4] Liu, Xiaoning e Hu, Gengkai. Elastic metamaterials making use of chirality: a review. *Strojniški vestnik- Journal of Mechanical Engineering*, 62(7-8):403–418, 2016.
- [5] Gan, Woon Siong. *New acoustics based on metamaterials*. New York: Springer, 2018.

- [6] Romero-Garcia, Vicente e Hladky-Hennion, Anne-Christine. *Fundamentals and applications of acoustic metamaterials: from seismic to radio frequency*. John Wiley & Sons, 2019.
- [7] Petkovska, Lidija e Cvetkovski, Goga. *Optimal Design Exploiting 3D Printing and Metamaterials*. London: IET The Institution of Engineering and Technology, 2021.
- [8] Wang, Yang; Zhao, Honggang; Yang, Haibin; Zhong, Jie; Zhao, Dan; Lu, Zhongliang e Wen, Jihong. A tunable sound-absorbing metamaterial based on coiled-up space. *Journal of Applied Physics*, 123(18): 185109, 2018.
- [9] Almeida, Gildean do N; Vergara, Erasmo F; Barbosa, Leandro R; Lenzi, Arcanjo e Birch, Robert S. A low-frequency sound absorber based on micro-slit and coiled cavity. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(3):1–9, 2021.
- [10] Almeida, Gildean Nascimento; Vergara, Erasmo Felipe; Barbosa, Leandro Rodrigues e Farias, Linconl César Bastos. Otimização de um metamaterial acústico labiríntico para absorção sonora na faixa de frequências de 100–300 Hz. *Acústica e Vibrações*, 35(52):7–22, 2020.
- [11] Almeida, Gildean do N; Vergara, Erasmo F; Barbosa, Leandro R e Brum, Ricardo. Low-frequency sound absorption of a metamaterial with symmetrical-coiled-up spaces. *Applied Acoustics*, 172:107593, 2021. doi: [10.1016/j.apacoust.2020.107593](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107593).
- [12] Almeida, Gildean do N; Vergara, Erasmo F; Barbosa, Leandro R; Lenzi, Arcanjo e Birch, Robert S. Sound absorption metasurface with symmetrical coiled spaces and micro slit of variable depth. *Applied Acoustics*, 183:108312, 2021. doi: [10.1016/j.apacoust.2021.108312](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108312).
- [13] Bückmann, Tiemo; Stenger, Nicolas; Kadic, Muamer; Kaschke, Johannes; Frölich, Andreas; Kennerknecht, Tobias; Eberl, Christoph; Thiel, Michael e Wegener, Martin. Tailored 3d mechanical metamaterials made by dip-in direct-laser-writing optical lithography. *Advanced Materials*, 24(20):2710–2714, 2012.
- [14] Dobnik Dubrovski, Polona; Novak, Nejc; Borovinšek, Matej; Vesenjaj, Matej e Ren, Zoran. In-plane behavior of auxetic non-woven fabric based on rotating square unit geometry under tensile load. *Polymers*, 11(6):1040, 2019.
- [15] Dobnik Dubrovski, Polona; Novak, Nejc; Borovinšek, Matej; Vesenjaj, Matej e Ren, Zoran. In-plane behavior of auxetic non-woven fabric based on rotating square unit geometry under tensile load. *Polymers*, 11(6):1040, 2019.
- [16] Xu, Jin; Wang, Ruoxing; Jiang, Haoqing; Liu, Xingtao; An, Licong; Jin, Shengyu; Deng, Biwei; Wu, Wenzhuo e Cheng, Gary J. Magnetically aligned ultrafine cobalt embedded 3d porous carbon metamaterial by one-step ultrafast laser direct writing. *Advanced Science*, pág. 2102477, 2021.
- [17] Mizzi, Luke; Salvati, Enrico; Spaggiari, Andrea; Tan, Jin-Chong e Korsunsky, Alexander M. Highly stretchable two-dimensional auxetic metamaterial sheets fabricated via direct-laser cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 167:105242, 2020.
- [18] Mizzi, Luke; Salvati, Enrico; Spaggiari, Andrea; Tan, Jin-Chong e Korsunsky, Alexander M. Highly stretchable two-dimensional auxetic metamaterial sheets fabricated via direct-laser cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 167:105242, 2020.
- [19] Signer, Madlaina; Ion, Alexandra e Sorkine-Hornung, Olga. Developable metamaterials: Mass-fabricable metamaterials by laser-cutting elastic structures. Em *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, págs. 1–13, 2021.
- [20] Wang, Qinghua; Gao, Bingtao; Raglione, Michella; Wang, Huixin; Li, Baojia; Toor, Fatima; Arnold, Mark A e Ding, Hongtao. Design, fabrication, and modulation of thz bandpass metamaterials. *Laser & Photonics Reviews*, 13(11):1900071, 2019.
- [21] Bansal, Shubhi e Subramanian, Sriram. A microfluidic acoustic metamaterial using electrowetting: Enabling active broadband tunability. *Advanced Materials Technologies*, 6(10):2100491, 2021.
- [22] Wang, Yang; Zhao, Honggang; Yang, Haibin; Zhong, Jie e Wen, Jihong. A space-coiled acoustic metamaterial with tunable low-frequency sound absorption. *EPL (Europhysics Letters)*, 120(5):54001, 2018.
- [23] Liu, Chong Rui; Wu, Jiu Hui; Yang, Zhengrui e Ma, Fuyin. Ultra-broadband acoustic absorption of a thin microperforated panel metamaterial with multi-order resonance. *Composite Structures*, 246:112366, 2020.
- [24] Stinson, Michael R. The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(2):550–558, 1991.
- [25] Rayleigh, Lord. Theory of sound, band ii. *Millan, London*, 1894.
- [26] Crandall, Irving Bardshar. *Theory of vibrating systems and sound*. D. Van Nostrand Company, 1926.
- [27] Maa, D-Y. Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions. *Sci. Sin.*, 18: 55–71, 1975.
- [28] MAA, Daa-You. Microperforated panel wideband absorber. *Noise control engineering journal*, págs. 77–84, 1987.
- [29] Okuzono, Takeshi; Nitta, Takao e Sakagami, Kimihiro. Note on microperforated panel model using equivalent-fluid-based absorption elements. *Acoustical Science and Technology*, 40(3):221–224, 2019.
- [30] ISO:10534-2. Acoustics-determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-part 2: Transfer-function method, 1998.
- [31] Powell, John. *CO2 laser cutting*. London: Springer, 1993.