

# A INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DOS METAMATERIAIS ACÚSTICOS NO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E NA CONSEQUENTE REDUÇÃO DE RUÍDO

Rafaela Benhur de Borba<sup>1</sup>, [rafaelabenhur@discente.ufg.br](mailto:rafaelabenhur@discente.ufg.br)  
Bruno Cordeiro e Silva<sup>1</sup>, [cordeirosilva@discente.ufg.br](mailto:cordeirosilva@discente.ufg.br)  
Marlipe Garcia Fagundes Neto<sup>1</sup>, [marlipe@ufg.br](mailto:marlipe@ufg.br)

<sup>1</sup> Universidade Federal de Goiás (UFG), Avenida Ingá, Prédio B5 (em frente a reitoria), Campus Samambaia

**Resumo.** Os metamateriais acústicos surgiram no intuito de tentar resolver alguns problemas pessoais e industriais, reduzindo uma grande porcentagem de ruídos em baixas frequências, aprimorando o funcionamento de maquinários e evitando a insatisfação e irritação de funcionários ou pessoas comuns. Analisando a importância da constante evolução dos estudos desses objetos, o presente trabalho aborda todo o processo utilizado no experimento, cujo objetivo foi revelar a influência de duas diferentes rugosidades em duas amostras no nível de pressão sonora e, conseqüentemente, na eficiência na diferença de nível. Para isso, foi utilizado um sistema composto de gerador digital, amplificador, caixa de autofalante e tubo conectado, inserindo os metamateriais na extremidade livre do tubo de acrílico e medindo os níveis de pressão sonora utilizando um sonômetro a um metro de distância da estrutura montada. No fim de todas as análises feitas, chegou-se à conclusão de que a influência da rugosidade nessas medições é bem significativa, já o uso de diferentes amostras revela efeitos irrelevantes para esses estudos.

**Palavras chave:** Metamateriais Acústicos. Rugosidade. Nível de Pressão Sonora

**Abstract.** Acoustic metamaterials emerged in order to try to solve some personal and industrial problems, reducing a large percentage of noise at low frequencies, improving the functioning of machinery and avoiding the dissatisfaction and irritation of employees or ordinary people. Analyzing the importance of the constant evolution of the studies of these objects, this report approaches the whole process used in the experiment, whose objective was to reveal the influence of two different roughnesses at two samples in the sound pressure level and, consequently, in the efficiency of the difference level. For this, a system composed of a digital generator, amplifier, speaker box and connected tube was used, inserting the metamaterials in the free end of the acrylic tube and measuring the sound pressure levels using a sound level meter one meter away from the assembled structure. At the end of all the analyses, it was concluded that the influence of roughness on these measurements is quite significant, since the use of different samples reveals irrelevant effects for these studies.

**Keywords:** Acoustic Metamaterials. Roughness. Sound Pressure Level

## 1. INTRODUÇÃO

O incômodo pessoal e o mau funcionamento de alguns equipamentos, provocados por ruídos e vibrações, tornaram de extrema relevância a busca infinita por soluções desses problemas que estão frequentemente presentes no cotidiano da sociedade e nos funcionários e maquinários de indústrias, por exemplo, de acordo com Sousa (2017). Então, trabalhos recentes (de Marins, 2018) revelam que os metamateriais acústicos foram criados com o objetivo de resolver tais problemas, aperfeiçoando os trabalhos nas fábricas e reduzindo a taxa de empregados insatisfeitos e prejudicados pelos ruídos.

Outra vantagem dos metamateriais acústicos é que eles são completamente abertos, então podem passar por eles a luz e o ar, menos o som, segundo Ghaffarivardavagh, et al., 2019. Já que a porosidade do material é um obstáculo para os sons e, em cada contato com as paredes porosas, parte dessa energia sonora, percorrendo dentro da estrutura, é perdida por absorção, mostrados em estudos recentes (de Sousa, 2020).

Com isso, recentemente, Silva (2016) mostrou que esses metamateriais estão ocupando, constantemente, um espaço importante na área de pesquisas. Já que se diferenciam dos primeiros materiais analisados para essa função, porque

possuem uma configuração geométrica, chamada de célula unitária, de acordo com Sousa (2020), com propriedades físicas não encontradas na natureza, que permite haver ressonâncias locais que impedem a propagação de onda acústica, usando absorção e outros parâmetros acústicos em baixas frequências. Além disso, observando trabalhos dos últimos anos (de Sousa, 2020), os metamateriais acústicos possuem periodicidade, isso significa que sua célula unitária forma uma estrutura periódica, se repetindo diversas vezes.

Entretanto, a descoberta e a configuração desses materiais que possibilitassem a absorção de som em baixas frequências não foi uma tarefa nada fácil. Depois de anos de estudos e pesquisas, Liu et al. realizaram o primeiro experimento, no ano 2000, por meio do uso de um arranjo 3D de esferas, revestidas com 2,5 mm de silicone e dispostas em uma geometria cúbica em uma matriz de epóxi, segundo Sousa (2017). Esse material foi excitado com ondas sonoras, deixando sua constante elástica negativa em frequências próximas aos *bandgaps*, que são estruturas periódicas que formam regiões em que ondas sonoras não se propagam em determinadas frequências.

Após essa descoberta, houve alguns outros testes, como o de Chen e Chan em 2007, em que construíram um material que absorvia sons em baixas frequências. Em seguida, outro material foi criado por Yang et al. em 2010, com o objetivo de absorver som entre 50 e 1000 Hz. Em 2015, Schwan et al. começaram seus estudos sobre a total reflexão e a absorção de ondas sonoras em materiais periódicos com ressonâncias locais, Leclaire et al. trouxeram a proposta de um material com determinado tipo de porosidade que possibilitasse a absorção em baixas frequências, Bonnet e Monchiet usaram materiais compósitos para a análise de ressonâncias locais em baixas frequências. Por fim, em 2017, Kiim et al. utilizaram metamateriais acústicos para análise de redução de ruídos de impacto. Todos esses estudos e descobertas foram realizados segundo estudos recentes (de Sousa, 2017).

Entretanto, as pesquisas sobre os metamateriais acústicos estão constantemente ativas, para um aperfeiçoamento ainda maior e uma melhor qualidade nas indústrias, restaurantes, boates, salas de aula, entre outros, que utilizam esse material para seu bom funcionamento.

## 2. OBJETIVO

Pensando nisso, esse artigo objetiva investigar a influência da rugosidade superficial em um metamaterial acústico. Para tanto, propõe-se utilizar o modelo apresentado por Ghaffarivardavagh, et al., 2019, onde o metamaterial será produzido pela técnica da manufatura aditiva por impressão 3D para obtenção de duas diferentes rugosidades superficial.

## 3. METODOLOGIA

Os metamateriais acústicos foram fabricados em impressoras 3D, sendo duas amostras compostas pelo material do tipo PLA e mais duas amostras compostas pelo material resina. A Fig. 1 apresenta as amostras, agrupadas em dois grupos R1 e R2, onde cada grupo contém uma amostra de PLA e de resina, totalizando 4 amostras a serem investigadas.

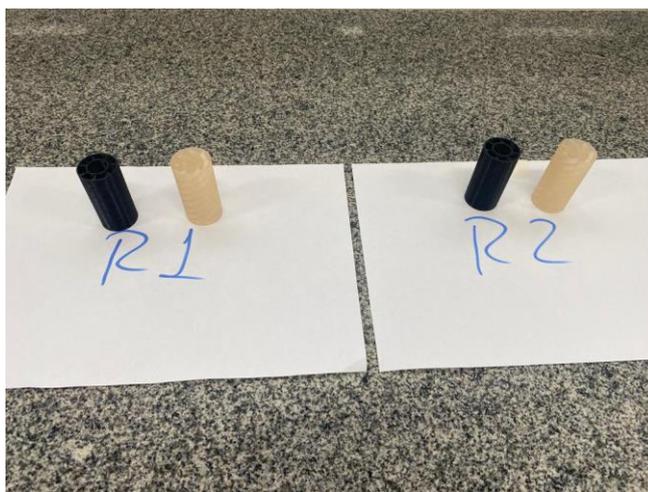


Figura 1. Metamateriais acústicos, PLA (cor mais escura) e resina (cor mais clara)

Para medição das rugosidades superficial utilizou o rugosímetro de fabricante Mitutoyo modelo Sj-210 (Fig. 2) e anotou a rugosidade em micrometro ( $\mu m$ ) dos metamateriais. Inicialmente, mediu-se em três pontos diferentes de cada amostra para, então, realizar o cálculo da média aritmética e do desvio padrão do nível de rugosidade de cada metamaterial, mostrados na Tab. 1.



Figura 2. Rugosímetro Mitutoyo, modelo Sj-210.

Tabela 1. Valores de rugosidade medidos, média aritmética e desvio padrão calculados.

Amostra	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média ( $\mu m$ )	Desvio Padrão ( $\mu m$ )
R1 Clara	2,196	2,283	2,204	2,228	0,039
R1 Escura	19,492	21,98	20,737	20,736	1,016
R2 Clara	2,012	2,542	2,082	2,212	0,235
R2 Escura	21,789	19,932	21,172	20,964	0,772

Conforme a Tabela 1, o metamaterial produzido por PLA (cor escura) possui rugosidade superficial média de 20,85  $\mu m$ , enquanto o produzido por resina (cor clara) tem rugosidade superficial média de 2,22, uma diferença de aproximadamente 9,4 vezes.

Depois, para a realização do experimento utilizou-se um gerador digital da marca Icel e modelo GV-2002, com a frequência ( $F$ ) e a tensão pico a pico ( $V_{pp}$ ) padronizadas, ligado a um amplificador de fabricante Leác's e modelo CA500, para corrigir o sinal sonoro que entraria na caixa de autofalante. Um tubo de acrílico, com duas aberturas (uma em cada extremidade), apoiado sobre duas placas de acrílico, foi conectado ao orifício da caixa. Assim, as amostras de metamateriais seriam inseridos na extremidade livre do tubo, para medição do nível de pressão sonora. As Figuras 3 e 4 mostram o gerador e amplificador usados, respectivamente.



Figura 3. Gerador Digital Icel.



Figura 4. Amplificador Leac's.

Com isso, o sonômetro, ou medidor de pressão sonora, Brüel & Kjaer (B&K) de classe 1 e de modelo 2250, foi apoiado em um tripé e colocado a um metro de distância da extremidade livre com o metamaterial acústico para iniciar o processo de medição. O sonômetro utilizado e a sua posição dentro do sistema montado estão representados na Figs. 5 e 6, respectivamente.



Figura 5. Sonômetro Brüel & Kjaer (B&K), modelo 2250.



Figura 6. Aparato experimental

O nível de pressão sonora equivalente ( $L_{eq}$ ) medido pelo sonômetro é obtido através da Eq. (1):

$$L_{eq} = 10 * \log_{10} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_p}{10}} dt \right] [dB] \quad (1)$$

Sendo  $L_p$  o nível de pressão sonora e  $T$  a constante de integração, no caso para a configuração *slow* igual a 1 s.

Em sequência, utiliza-se um planejamento fatorial sendo:

1. Objetivo do experimento: Verificar a influência da rugosidade em metamateriais acústicos – Por meio da comparação do nível de pressão sonora ( $L_{eq}$ ) medido em metamateriais com duas diferentes rugosidades;
2. Tipo de experimento: fatorial de  $2^2$  – Resultando em duas amostras de cada um dos dois materiais, totalizando 4 metamateriais estudados;
3. Número de repetições: 5 - Registrando vinte medições totais, com o mesmo número de repetições para cada amostra utilizada;
4. Fatores: 2 – A rugosidade (do PLA e da Resina) e a amostra (1 e 2) são os fatores que serão considerados para a análise de suas influências para o  $L_{eq}$  final encontrado;
5. Determinação da ordem aleatória de realização dos ensaios para minimizar a influências de erros sistemáticos

Por fim, o experimento é conduzido no Laboratório de Mecânica Aplicada da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, da seguinte forma:

1. Ajuste do gerador de sinal para onda harmônica com  $F = 2040 \text{ Hz}$  e  $V_{pp} = 0,75 \text{ V}$ . A frequência é determinada pela faixa de absorção do metamaterial, conforme Ghaffarivardavagh, et al., 2019;
2. Medição do ruído de fundo na posição em que se encontra o medidor de pressão sonora, isto é, a 1 metro da extremidade livre com o metamaterial;
3. Ajuste do amplificador de potência de tal modo que o nível de pressão sonora com o metamaterial fosse superior à no mínimo 10 dB ao ruído de fundo;
4. Posicionamento do metamaterial acústico, conforme ordem do planejamento experimental, faceado à extremidade livre do tubo de acrílico;
5. Medição do nível de pressão sonora por 30 segundos;
6. Repetir passos 4 e 5 até todos os ensaios (20 medições – 4 metamateriais com 5 réplicas) serem realizados.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Ordem aleatória de realização dos ensaios

Na Tabela 2, dispõe-se da ordem de realização das medições, com rugosidade e amostra. Ressalta-se que a ordem dos ensaios foi determinada de forma aleatória.

Tabela 2. Definição da ordem de medição dos níveis de pressão sonora.

Ordem do Experimento para comparação da influência dos dois fatores no nível de pressão sonora			
Ordem de ensaio	Fatores analisados		Material
	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	Amostras	
1	2,228 $\pm$ 0,039	R1	Resina
2	20,736 $\pm$ 1,016	R1	PLA
3	20,736 $\pm$ 1,016	R1	PLA
4	2,228 $\pm$ 0,039	R1	Resina
5	2,228 $\pm$ 0,039	R1	Resina
6	20,736 $\pm$ 1,016	R1	PLA
7	20,964 $\pm$ 0,772	R2	PLA
8	20,964 $\pm$ 0,772	R2	PLA
9	20,736 $\pm$ 1,016	R1	PLA
10	2,228 $\pm$ 0,039	R1	Resina
11	20,964 $\pm$ 0,772	R2	PLA
12	2,212 $\pm$ 0,235	R2	Resina
13	2,212 $\pm$ 0,235	R2	Resina
14	20,964 $\pm$ 0,772	R2	PLA
15	2,212 $\pm$ 0,235	R2	Resina
16	2,212 $\pm$ 0,235	R2	Resina
17	20,964 $\pm$ 0,772	R2	PLA
18	2,212 $\pm$ 0,235	R2	Resina
19	20,736 $\pm$ 1,016	R1	PLA
20	2,228 $\pm$ 0,039	R1	Resina

Assim, iniciou-se o experimento por meio da inserção de cada um desses metamateriais selecionados de forma ordenada pela Tab. 2.

#### 4.2. Medição dos níveis de pressão sonora

Assim, com a ordem de medição em mãos e com a realização de todos os ajustes necessários, foi medido o nível de pressão sonora para cada um dos ensaios, durante 30 segundos. Na Tabela 3, é possível visualizar as medidas encontradas e anotadas.

Tabela 3. Níveis de pressão sonora ( $L_{eq}$ ) medidos.

Ensaio	$L_{eq}$ (dB)	Material
1	56,8	Resina
2	64,5	PLA
3	62,3	PLA
4	58,3	Resina
5	57,3	Resina
6	62,4	PLA
7	62,8	PLA
8	60,6	PLA
9	61,1	PLA
10	62,0	Resina
11	64,0	PLA
12	57,8	Resina
13	58,6	Resina
14	59,2	PLA
15	59,7	Resina

16	58,3	Resina
17	61,3	PLA
18	60,3	Resina
19	61,3	PLA
20	61,5	Resina

Diante dos valores apresentados na Tab. 3, observa-se que de um modo geral o nível de pressão sonora quando utilizando o metamaterial de resina é menor, isto é, menor a rugosidade melhor o efeito de redução de ruído. No entanto, para obter um resultado estatisticamente significativo utiliza-se a análise de variância.

### 4.3. Análise de variância

Na Tabela 4, apresenta-se o resultado da análise de variância para o experimento conduzido.

Tabela 4. Análise de variância

Fonte	GL	SQ Seq	QM	Valor F	Valor-P
Modelo	3	43,2735	14,4245	4,72	0,015
Linear	2	42,9610	21,4805	7,03	0,006
Rugosidade	1	41,7605	41,7605	13,67	0,002
Amostra	1	1,2005	1,2005	0,39	0,540
Interação	1	0,3125	0,3125	0,10	0,753
Rugosidade*Amostra	1	0,3125	0,3125	0,10	0,753
Erro	16	48,8960	3,0560		
Total	19	92,1695			

Conforme a Tabela 4 e considerando uma significância de 5 % (confiabilidade de 95 %), verifica-se que o fator Rugosidade é o mais significativo para explicar a diferença de  $L_{eq}$  observada no experimento, pois possui valor-P menor que 5 %.

Com o propósito de contribuir com o relatado na Tab. 5, tem-se o efeito de cada um dos fatores, enquanto na Fig. 7 há o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.

Tabela 5. Efeitos gerados pelos fatores de análise de influência

Fatores	Efeito
Rugosidade (A)	-2,89
Amostra (B)	-0,49
Rugosidade * Amostra (AB)	-0,25

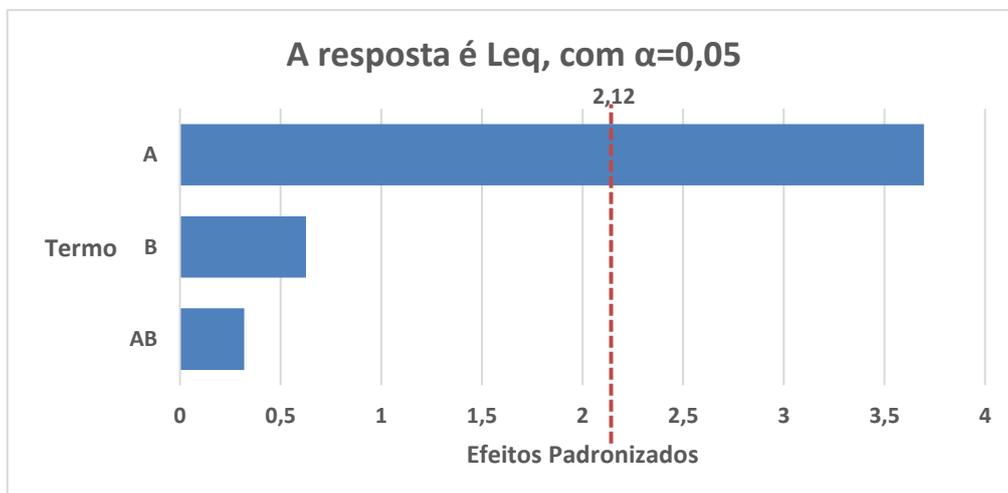


Figura 7. Gráfico dos efeitos de cada fator em relação às medições do  $L_{eq}$

Outrossim, é possível perceber que a rugosidade é o fator de maior influência na medição de nível de pressão sonora usando metamateriais acústicos. Já que, analisando a Fig. 7, o fator de rugosidade teve um efeito consideravelmente maior, possibilitando que os outros fatores fossem praticamente desprezíveis.

## 5. CONCLUSÃO

Nesse artigo, foi estudado os metamateriais acústicos, aprofundando os conhecimentos em fatores dessas amostras que podem influenciar nos valores de níveis de pressão sonora e, conseqüentemente, na eficácia desses objetos em absorver ruídos e melhorar o ambiente no âmbito da acústica.

Assim, por meio desse experimento, chegou-se a conclusão de que a rugosidade influencia nessas medições de forma considerável, já as diferentes amostras resultam em uma influência praticamente desprezível. Para provar essa afirmação final foram analisados os efeitos de dois fatores sugeridos, por meio de seus coeficientes e do gráfico. Esses resultados vieram do experimento realizado no laboratório de acústica do prédio da Engenharia Mecânica da UFG, no Câmpus Samambaia, utilizando a análise fatorial com análise de variância, e os valores medidos através de um sistema montado (gerador, amplificador, caixa de autofalante, tubo conectado e metamateriais acústicos inseridos no tubo) e do sonômetro.

Logo, visando obter uma análise ainda mais significativa e de melhor visualização, um procedimento que pode ser acrescentado é a realização de maiores quantidades de repetições de medições de nível de pressão sonora e o aumento do número de metamateriais acústicos com grandes rugosidades e outras amostras com rugosidades ainda menores do que aqueles de resina usados no presente experimento, ampliando, então, o coeficiente de efeito da rugosidade.

## 6. AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu agradeço ao Programa de Educação Tutorial da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação (PET – EMC) pelo apoio e por ter me incentivado a iniciar o projeto de iniciação científica. Eu agradeço também à Universidade Federal de Goiás (UFG) e à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação da UFG por todo o suporte e por me disponibilizar o Laboratório de Acústica para a realização dos meus experimentos.

## 7. REFERÊNCIAS

- Almeida, G.N., Vergara, E.F., Barbosa, L.R., Farias, L.C.B., 2020. “Otimização de um metamaterial acústico labiríntico para absorção sonora na faixa de frequências de 100 - 300 Hz”. Programa de pós graduação em engenharia mecânica, laboratório de vibrações e acústica (LVA), universidade federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil.
- Ghaffarivardavagh, R., Nikolajczyk, J., Anderson, S., Zhang, X., 2019. “Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference”. Department of Mechanical Engineering and Department of Radiology, Boston, USA.
- Marins, A.F., 2018. “Tecnologia de controle de ruído em equipamentos industriais por enclausuramento acústico”. XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Rio Grande do Sul, Brasil.
- Silva, T.A.L., 2016. “Investigação experimental dos efeitos da variabilidade de fabricação em metamateriais acústicos”. Projeto de Graduação da Universidade de Brasília. Brasília, Brasil.
- Sousa, A.R.C., 2017. “Modelagem de metamaterial acústico para absorção sonora em baixas frequências”. Florianópolis, Brasil.
- Sousa, A.R.C., 2020. “Metamaterias e metasuperfícies acústicas: uma introdução”. 29 Out. 2020 <<https://www.concepcaoacustica.com/post/metamateriais-acusticos>>