

## A INFLUÊNCIA DA IMPRESSÃO 3D NA PRODUÇÃO DE METAMATERIAIS ACÚSTICOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Bruno Cordeiro e Silva<sup>1</sup>, [cordeirosilva@discente.ufg.br](mailto:cordeirosilva@discente.ufg.br)  
Rafaela Benhur de Borba<sup>1</sup>, [rafaelabenhur@discente.ufg.br](mailto:rafaelabenhur@discente.ufg.br)  
Matheus Cesarino Pereira<sup>1</sup>, [matheus.cesarino@discente.ufg.br](mailto:matheus.cesarino@discente.ufg.br)  
Marlize Garcia Fagundes Neto<sup>1</sup>, [marlize@ufg.br](mailto:marlize@ufg.br)

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

**Resumo.** Os metamateriais acústicos são materiais que possuem características físicas não encontrados na natureza e podem ser utilizados para se obter comportamentos de absorção sonora, até então, impossíveis com materiais convencionais. O objetivo desta revisão bibliográfica é selecionar de forma sistemática artigos científicos relevantes que dissertem sobre a influência da impressão 3D na produção de metamateriais acústicos utilizando a base de dados da Scopus. Para tanto, foi utilizado a ferramenta de busca avançada do site da Scopus a fim de filtrar a quantidade de artigos a serem lidos, selecionando numa primeira vista artigos relacionados a engenharia e ciência dos materiais. Por fim obteve-se setenta e seis artigos dos quais dois se sobressaíram como os mais citados e outros dois como os mais convergentes relacionados à temática. A recente data de publicação desses artigos compreendidos entre 2014 e 2023 revela uma dominância chinesa na produção científica sobre o tema, além de que atualmente é o período de maior intensidade de estudo e que novos métodos de produção dos metamateriais traz consigo um futuro promissor para pesquisa nessa área.

**Palavras chave:** Acústica. Metamateriais, Metasuperfícies. Impressão 3D.

**Abstract.** Acoustic metamaterials are materials that have physical characteristics not found in nature and can be used to obtain sound absorption behaviors, until then, impossible with conventional materials. The objective of this bibliographic review is to systematically select relevant scientific articles that discuss the influence of 3D printing in the production of acoustic metamaterials using the Scopus database. For this purpose, the advanced search tool on the Scopus website was used in order to filter the number of articles to be read, selecting at first look articles related to engineering and materials science. Finally, seventy-six articles were obtained, of which two stood out as the most cited and two others as the most convergent related to the influence of 3D printing in the production of acoustic metamaterials. The recent publication date of these articles between 2014 and 2023 reveals a Chinese dominance in the scientific production on the subject, in addition to the fact that currently it is the period of greatest intensity of study and that new methods of producing metamaterials bring with them a promising future for research in that area.

**Keywords:** Acoustics. Metamaterials. Metasurfaces. 3D print.

### 1. INTRODUÇÃO

Metamaterial é um material compósito que possui características físicas que imitam características de outro material ou que não são encontradas na natureza, fabricado artificialmente a partir de parâmetros geométricos da própria estrutura e de inclusões (Engheta, 2006). A aplicação destes materiais é diversa, passando do eletromagnetismo até a termodinâmica (Fig. 1), áreas as quais possuem algo em comum em relação aos metamateriais, dupla negatividade de propriedades efetivas, propriedades essas que na acústica são a densidade e o módulo volumétrico (módulo de Bulk).

Os metamateriais acústicos tem sua maior efetividade para ondas sonoras de baixa frequência, uma vez que que silenciadores acústicos convencionais (porosos) possuem baixa absorção sonora nessa faixa de frequência, além de demandar uma dimensão relativamente alta tendo em vista o alto comprimento de onda (Almeida, 2019). Desta forma, os metamateriais acústicos suprem essa deficiência haja vista que suas dimensões são extremamente econômicas e são capazes de absorverem grande parte do som em baixa frequência. Aliado à essa recente descoberta se encontra a manufatura aditiva por impressão 3D, o que em determinado ponto juntou-se a temática dos metamateriais e agora busca-se fabricá-los por meio deste processo de fabricação. Portanto, este trabalho busca reunir, segundo a elegibilidade que

será mostrada a seguir, os artigos que se mostraram mais relevantes à temática abordada, que em suma é a influência da manufatura por impressão 3D de metamateriais acústicos.

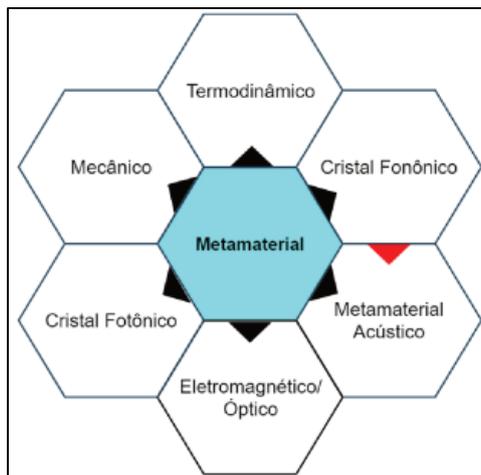


Figura 1 – Organograma dos tipos de metamateriais (Almeida, 2019)

## 2. METODOLOGIA

Para esta revisão bibliográfica utilizou-se a biblioteca de trabalhos científicos da Scopus ([www.scopus.com](http://www.scopus.com)) a fim de se obter uma gama de artigos que seguem as palavras-chave definidas. Desta forma, utilizou-se a ferramenta de pesquisa por palavras-chave (*keywords*) sendo a pesquisa realizada separando cada palavra pelos operadores "AND" (devem aparecer simultaneamente) e "OR" (se excluem mutuamente).

Considerando que na literatura o conceito de metamateriais ainda é bastante recente, duas palavras-chave para este foram utilizadas, são elas metamateriais e metasuperfícies. Portanto, neste trabalho foi utilizado a seguinte pesquisa avançada: "*metasurfaces OR metamaterials AND acoustics AND 3d*", como ilustrado na Fig. 2.

Apenas com essas palavras-chave e nenhum filtro resultou em 122 trabalhos, aplicando os filtros (Fig. 3) relacionados a engenharia (*engineering*) e ciências dos materiais (*science materials*) resultou em 76 artigos (pesquisa realizada em 15/12/2022) sendo que as primeiras publicações datam de 2014 e as últimas em 2023.

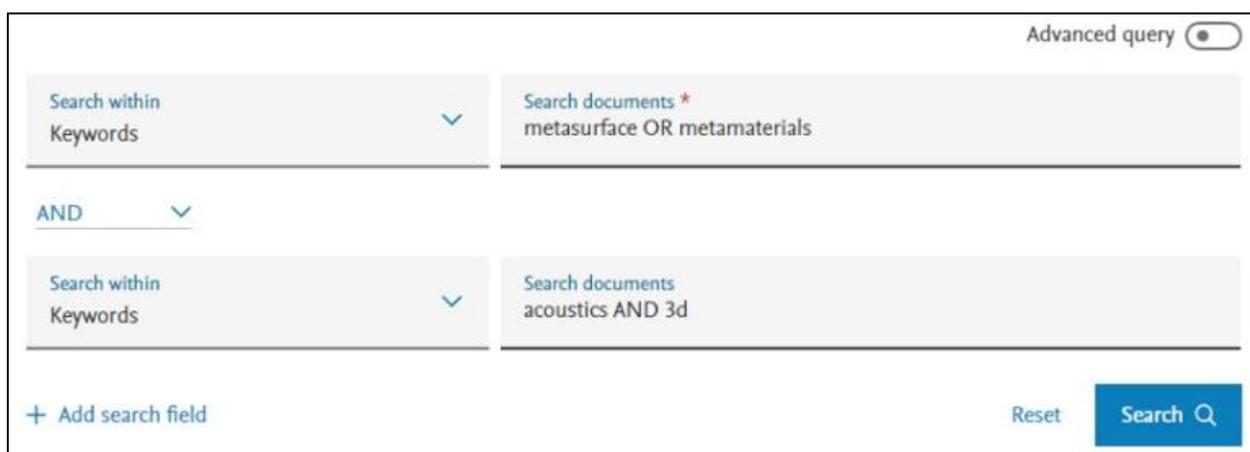


Figura 2 – Pesquisa por palavras-chave realizada (Próprio autor, 2023)

A prioridade e elegibilidade de artigos foram definidos por meio da ferramenta de filtro de pesquisa "mais citados" como destacado na Fig. 3, desta forma foram averiguados todos artigos produzidos a partir de 2014 até 2023 em ordem decrescente de citações. Por meio da leitura dos resumos destes artigos mais citados foram selecionados numa primeira vista os trabalhos que possuíssem a manufatura aditiva por impressão 3D de metamateriais acústicos como ponto principal (10 artigos selecionados).

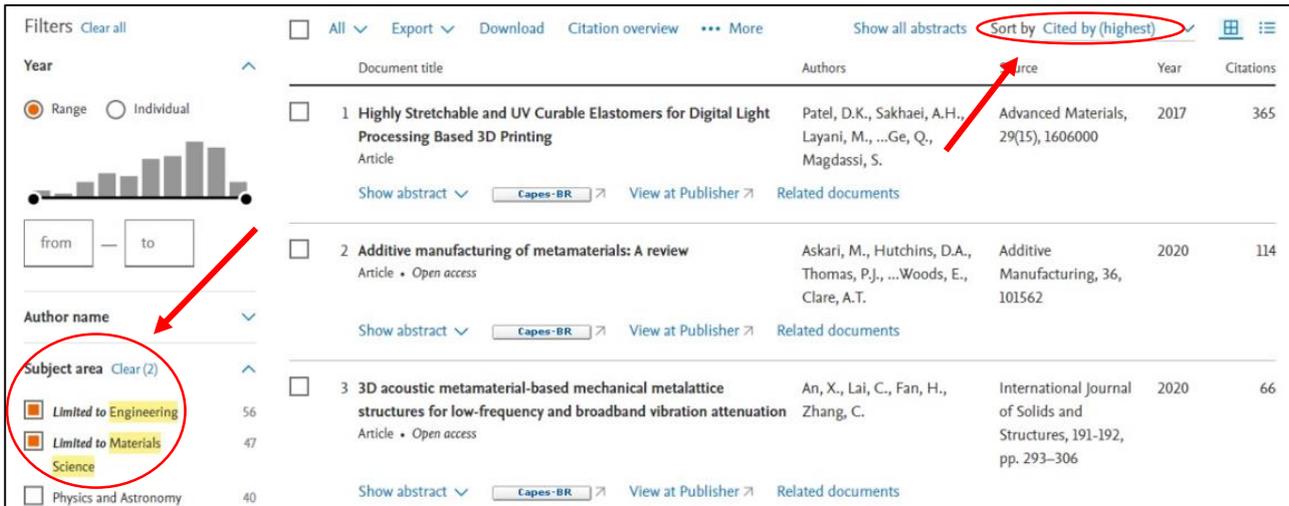


Figura 3 – Filtros aplicados na busca (próprio autor, 2023)

### 3. RESULTADOS

A primeira vista é interessante notar a dominância da China seguida dos Estados Unidos na produção de artigos relacionados aos metamateriais acústicos e impressão 3D como ilustrado na Fig. 4, enquanto que o Brasil sequer consta no banco de dados da Scopus, mostrando um atraso com relação à tendência mundial na pesquisa de metamateriais acústicos.

Um dos trabalhos mais citados é de origem chinesa e outro de Singapura, citações advindas da grande escala de produção científica chinesa, enquanto os dois que mais convergiram com a temática foram do Reino Unido (terceiro lugar segundo a Fig. 4), especificamente de Dublin, Irlanda.

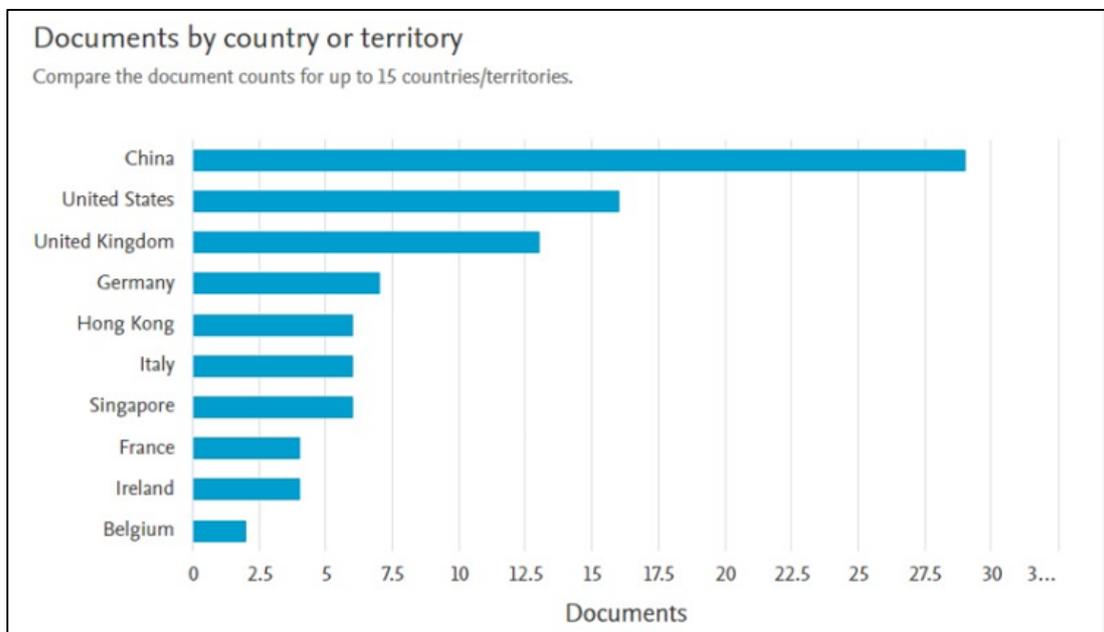


Figura 4 – Quantidade de documentos por país ou território (Scopus, 2023)

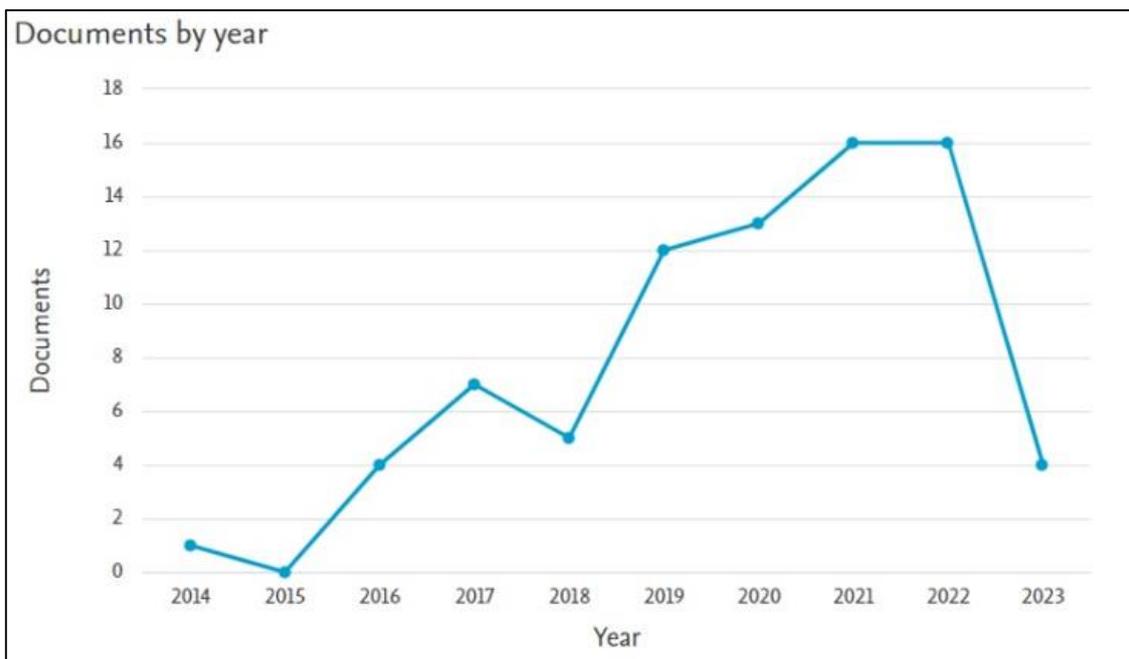


Figura 5 – quantidade de documentos por ano (Scopus, 2023))

Além disso, observa-se pela Fig. 5 um crescimento na quantidade de artigos publicados no decorrer dos anos e, portanto, uma tendência em aumentar ainda mais a partir de 2023 haja vista as inovações com relação à metamateriais acústicos e instrumentos de manufatura aditiva. Inovações as quais já foram encontradas entre os resultados da pesquisa, que dissertam sobre a fabricação de metamateriais acústicos por meio da impressão 4D, por exemplo.

### 3.1. Os mais citados

O artigo apresentado na Tab.1 é trata-se da modelagem da estrutura ressonante, principalmente em seus princípios matemáticos e geométricos, que se fundamentam em uma microrrede de placas baseadas em uma estrutura Cúbica de Face Centrada (FCC) e uma treliça baseada em FCC — no trabalho quatro estruturas desenvolvidas por Fusão Seletiva a Laser (SLM) foram testadas segundo diferentes camadas, como ilustrado na Fig. 6, e verificada suas absorções sonoras numa faixa de frequência de 1000Hz – 6300Hz. Além disso, é apresentado uma ampliação do Princípio de Ressonância de Helmholtz, denominado no trabalho de “Teoria da Célula Ressonante em Cascata”

Tabela 1 - Primeiro artigo mais citado (Próprio autor, 2023)

<i>Microlattice Metamaterials with Simultaneous Superior Acoustic and Mechanical Energy Absorption</i>		
Autores	Li, Xinwei; Yu, Xiang; Chua, Jun Wei; Lee, Heow Pueh; Ding, Jun; Zhai, Wei	
Ano de publicação	Citações	Journal
2021	36	Small

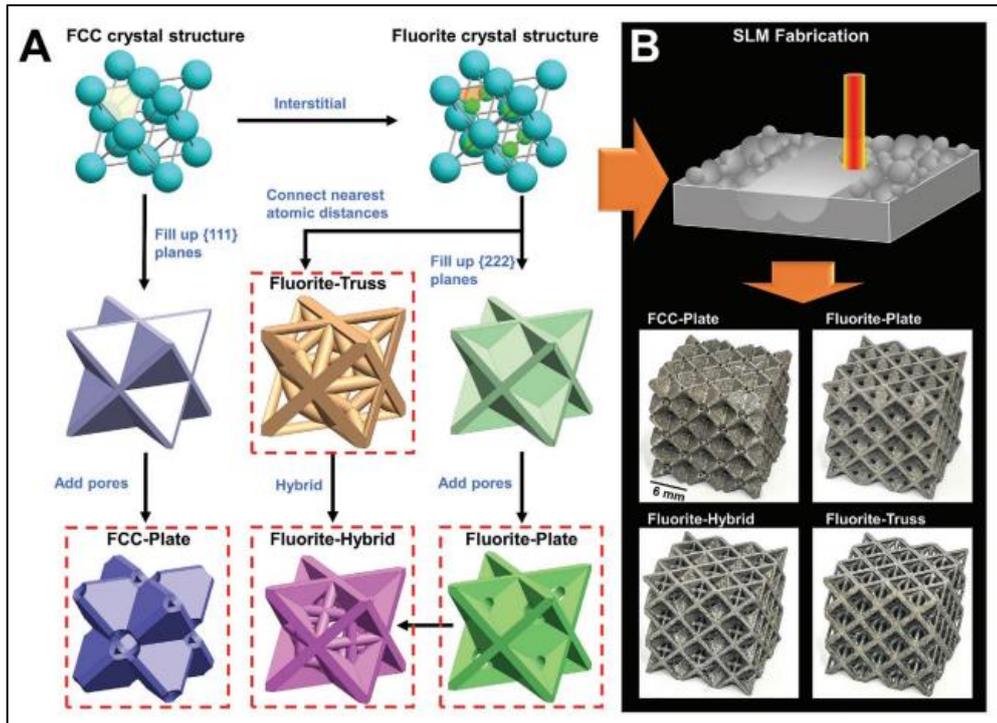


Figura 6 – A) Ilustração esquemática da geometria das estruturas. B) Imagem digital da microrrede formada por SLM (Li, 2021)

O trabalho da Tab.2 discorre sobre o uso de metamateriais acústicos no controle de transmissão sonora submerso na água em baixas frequências. O metamaterial é desenvolvido por Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e possui um comportamento hidrofóbico de tal forma que quando submerso em água é capaz de criar bolhas de ar incluídas no meio aquoso, como mostrado na Fig. 7. As bolhas de ar criadas, neste caso, são as estruturas ressonantes por possuir um Módulo de Bulk menor que o do meio aquoso e são responsáveis por espalhar o som incidente. O material tinha um acabamento superficial áspero, porém não é muito dissertado sobre isso.

Tabela 2 - Segundo artigo mais citado (Próprio autor, 2023)

<i>Bubble Architectures for Locally Resonant Acoustic Metamaterials</i>		
Autores	Cai, Zheren; Zhao, Shengdong; Huang, Zhandong; Li, Zheng; Su, Meng; Zhang, Zeying; Zhao, Zhipeng; Hu, Xiaotian; Wang, Yue Sheng; Song, Yanlin	
Ano de publicação	Citações	Journal
2019	36	Advanced Functional Materials

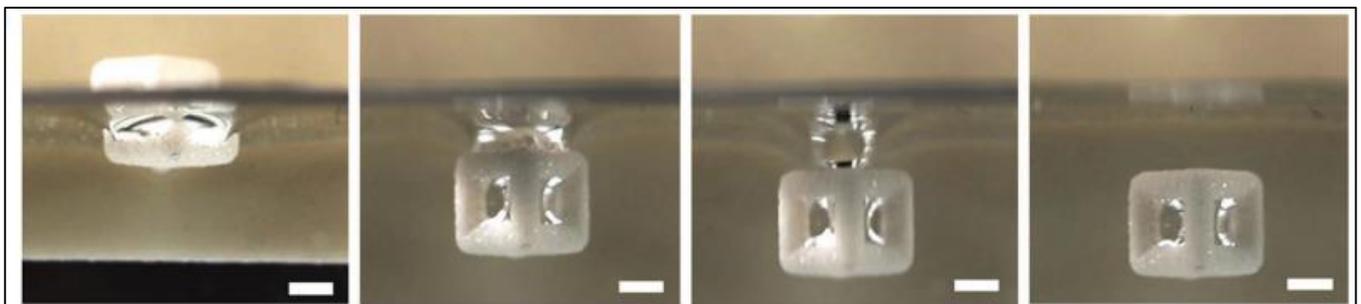


Figura 7 – O processo de formação de bolhas na estrutura hidrofobia imersa em água (Cai, 2019)

### 3.2. Classificados como os mais convergentes

No artigo presente na Tab. 3 é comparado a absorção sonora numa faixa de frequência de 500Hz – 3500Hz de uma geometria de estrutura específica para diferentes métodos de produção por impressão 3D, como expresso na Fig. 8. São estes a Modelagem de Deposição Fundida (FDM) a Estereolitografia (SLA), o Processamento Digital de Luz (DLP) e a Fusão Seletiva a Laser (SLM). Desta forma, é evidenciado as vantagens e desvantagens de utilizar cada método como validação de referência para fabricação de metamateriais acústicos.

Tabela 3 - Segundo artigo mais convergente (Próprio autor, 2023)

<i>The Influence of Additive Manufacturing Processes on the Performance of a Periodic Acoustic Metamaterial</i>		
Autores	Kennedy, J.; Flanagan, L.; Dowling, L.; Bennett, G. J.; Rice, H.; Trimble, D.	
Ano de publicação	Citações	Journal
2019	34	International Journal of Polymer Science

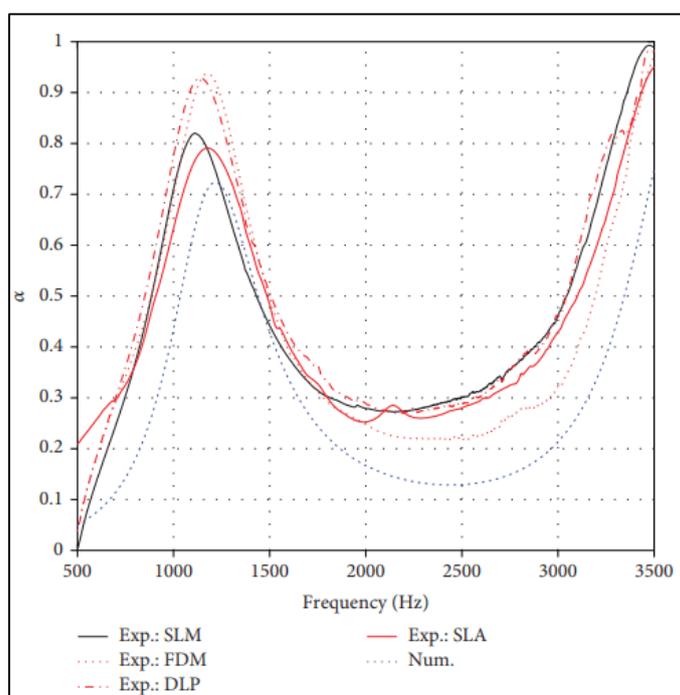


Figura 8 – Coeficiente de absorção sonora de 4 impressões diferentes de estruturas com 10 camadas (Kennedy, 2019)

Neste artigo apresentado na Tab. 4 é proposto uma geometria de célula unitária denominado Célula de Kelvin, uma forma específica de tetradecaedro, que foi fabricado por dois métodos de impressão 3D, o DLP, no qual foi utilizado polímero como material, e o SLM, no qual utilizou-se cobalto-cromo como material. Para as amostras desenvolvidas, foram comparados os coeficientes de absorção sonora em uma faixa de frequência de 500Hz – 3500Hz. Notou-se microscopicamente uma diferença de acabamento superficial e tolerância dimensional (devido aos diferentes processos de fabricação) entre as amostras, como ilustrado na Fig. 9, que provocou uma diferença significativa na absorção sonora para uma mesma geometria, tanto de uma com relação a outra quanto de uma amostra e sua simulação numérica.

Tabela 4 - Terceiro artigo mais convergente (Próprio autor, 2023)

<i>Design of a Kelvin Cell Acoustic Metamaterial</i>		
Autores	Rice, H. J.; Kennedy, J.; Göransson, P.; Dowling, L.; Trimble, D.;	
Ano de publicação	Citações	Journal
2020	26	Journal of Sound and Vibration

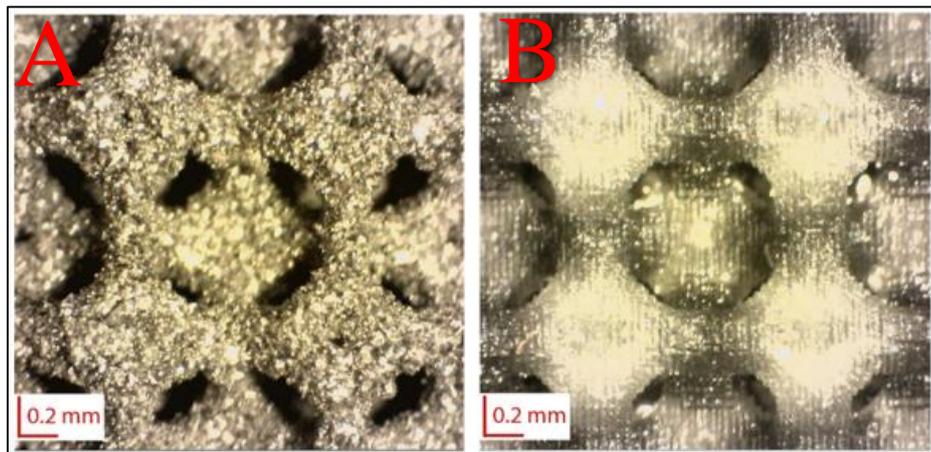


Figura 9 – A) Imagem microscópica da amostra fabricada por SLM. B) Imagem microscópica da amostra fabricada por DLP (Rice, 2020)

#### 4. CONCLUSÃO

As ferramentas de busca avançada utilizadas se mostraram eficientes para filtrar a quantidade de trabalhos requeridos, diminuindo de 124 para apenas 76 resultados, possibilitando uma leitura mais atenciosa e rápida de todos 76 resumos. Portanto é visível que esta área focada na engenharia e ciência dos materiais se mostra bastante recente, haja vista a baixa quantidade de resultados obtidos e o fato dos primeiros trabalhos serem publicados apenas a partir de 2014. No entanto, apesar disso, obteve-se dois trabalhos que convergiram fortemente para o assunto requerido e que possuem uma quantidade elevada de citações, corroborando com o método sistemático de revisão bibliográfica adotado.

Além disso, apesar da China tomar frente na produção científica relacionada aos metamateriais acústicos e impressão 3D, os artigos que mais convergiram não vieram deste país, mas sim da Irlanda, ressalta-se que o Departamento de Engenharia Mecânica, Manufatura e Biomédica da *Trinity College Dublin* participou dos dois trabalhos que mais convergiram com o tema.

Vale ressaltar, por fim, que pelo fato da manufatura aditiva por impressão 3D alheia a fabricação de metamateriais acústicos ser um assunto recente, o desenvolvimento e criação de novos metamateriais e formas de produção está em seu momento de maior intensidade. Assim sendo associado aos artigos encontrados já é possível encontrar métodos de produção de metamateriais acústicos por impressão 4D, uma forma de fabricação extremamente recente, o que revela um futuro campo de estudos bastante promissor.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação da Universidade Federal de Goiás (PRPI/UFG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade e auxílio financeiro à pesquisa nesta área de metamateriais acústicos.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Almeida, G.N., Vergara, E.F., Barbosa, L.R., Farias, L.C.B., 2020. “Otimização de um metamaterial acústico labiríntico para absorção sonora de baixas frequências”. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, laboratório de vibrações e acústica (LVA), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brazil.
- Cai, Z., Zhao, S., Huang, Z., Li, Z., Su, M., Zhang, Z., Zhao, Z., Hu, X., Wang, Y. S., Song, Y., 2019. “Bubble Architectures for Locally Resonant Acoustic Metamaterials”. *Advanced Functional Materials*, China.
- Engheta, N., Ziolkowski, R. W., 2006. “Metamaterials: physics and engineering explorations”. Institute of Electrical and Electronics Engineers, John Wiley & Sons, 1ª edição.
- Kennedy, J., Flanagan, L., Dowling, L., Bennett, G. J., Rice, H., Trimble, D., 2019. “The Influence of Additive Manufacturing Processes on the Performance of a Periodic Acoustic Metamaterial”. Department of Mechanical Engineering, Dublin, Irlanda.
- Li, X., Yu, X., Chua, J., Lee, H. P., Ding, J., Zhai, W., 2021. “Microlattice Metamaterials with Simultaneous Superior Acoustic and Mechanical Energy Absorption”. Small, Singapura.
- Rice, H. J., Kennedy, J., Göransson, P., Dowling, L., Trimble, D., 2020. “Design of a Kelvin Cell Acoustic Metamaterial”. Department of Mechanical Engineering, Dublin, Irlanda.