

Projeto e Simulação Computacional de Geometrias de Mantos de Metamateriais para Camuflagem Acústica Submarina

Marco André Desbrousses Cotta

Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha (CGAEM), Niterói/RJ – Brasil

Resumo – A manipulação de ondas acústicas por mantos de metamateriais tem sido investigada como alternativa para camuflagem acústica submarina. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador computacional destinado ao projeto e análise de diferentes geometrias de mantos, incluindo anéis concêntricos, grades cartesianas, espirais logarítmicas e padrões hexagonais, com o objetivo de reduzir o espalhamento acústico de objetos submersos. A abordagem adapta para a faixa acústica submarina, na ordem de quilohertz, técnicas originalmente aplicadas em frequências eletromagnéticas de gigahertz, ajustando as dimensões das estruturas de micrômetros para centímetros. Essa adaptação é relevante devido às particularidades da propagação acústica em meios líquidos, baseada em compressão e rarefação molecular. As simulações mostraram que a geometria do manto exerce influência direta na eficiência de camuflagem, com anéis concêntricos alcançando 87% de eficiência, enquanto grades e padrões hexagonais apresentaram desempenhos intermediários, confirmando a consistência da metodologia e a aplicabilidade do modelo.

Palavras-Chave – Metamateriais acústicos, Camuflagem submarina e Simulação numérica.

I. INTRODUÇÃO

O controle da propagação de ondas acústicas constitui um tema recorrente na física aplicada, com implicações diretas em tecnologias de comunicação, detecção e isolamento acústico [1]. A descoberta e o desenvolvimento de metamateriais, estruturas compostas que exibem propriedades físicas não encontradas em materiais naturais, revolucionaram as abordagens tradicionais, permitindo manipular ondas de forma precisa [2].

Em particular, a camuflagem acústica visa reduzir ou eliminar a assinatura acústica de objetos perante ondas incidentes, o que é desejável tanto em aplicações civis quanto militares [3]. A técnica de manta acústica baseia-se na aplicação de uma camada superficial de metamaterial com propriedades de impedância ajustadas para cancelar o campo espalhado pelo objeto, minimizando o espalhamento acústico do objeto [4].

Entretanto, a eficácia dessas mantas depende não apenas das propriedades materiais, mas também da geometria do arranjo, fator que pode influenciar significativamente a distribuição do campo de espalhamento [5]. Estudos recentes sugerem que arranjos complexos podem produzir efeitos de interferência favoráveis à camuflagem, embora o

entendimento completo desse fenômeno ainda esteja em desenvolvimento [1].

Neste contexto, o presente trabalho propõe uma análise sistemática do impacto de diferentes geometrias de mantos sobre a eficiência de camuflagem, por meio de simulação numérica baseada na resolução da equação de Helmholtz modificada para meios heterogêneos.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A propagação de ondas acústicas em meios isotrópicos é classicamente modelada pela equação da onda, que, em regime harmônico, reduz-se à equação de Helmholtz:

$$\nabla^2 P(r) + k^2(r)P(r) = 0, \quad (1)$$

onde $P(r)$ é a amplitude complexa da pressão acústica e $k(r)$ é o número de onda local, dependente da posição [3].

Em metamateriais acústicos, a variação espacial de propriedades efetivas como densidade $\rho(r)$ e módulo de compressibilidade $K(r)$ altera a relação de dispersão:

$$k(r) = \omega \sqrt{\frac{\rho(r)}{K(r)}}, \quad (2)$$

onde ω é a frequência angular da onda [5].

A eficiência de um manto de metamaterial é diretamente relacionada à capacidade de ajustar a impedância acústica superficial Z_s , de modo que o campo espalhado resultante seja minimizado. A condição de contorno de impedância é expressa por:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial n} \right|_{\text{superfície}} + ikZ_s P = 0, \quad (3)$$

conforme derivado nos trabalhos de [4].

Idealmente, o manto deve gerar um campo espalhado $P_{sc}^{(manto)}$ de mesma amplitude e fase oposta ao campo espalhado pelo objeto $P_{sc}^{(objeto)}$, de modo que ambos se cancelem no espaço exterior.

Assim, o campo espalhado total pode ser escrito como:

$$P_{SC}^{(total)} = P_{SC}^{(objeto)} + P_{SC}^{(manto)}. \quad (4)$$

A dependência explícita do campo espalhado com a impedância superficial pode ser expressa de forma simplificada como:

$$P_{SC}^{(total)} \propto \frac{z_s - z_0}{z_s + z_0}, \quad (5)$$

onde z_0 representa a impedância característica do meio externo (água do mar). Nota-se que, quando $z_s \rightarrow z_0$, a razão tende a zero, reduzindo drasticamente o espalhamento. Esse resultado é consistente com o princípio de casamento de impedâncias e reforça a importância do ajuste geométrico e material do manto:

$$\min_{z_s} \left(\int_{\Omega} |P_{SC}|^2 d\Omega \right), \quad (6)$$

em que Ω representa a região de interesse no espaço [1].

Além disso, variações suaves e contínuas de impedância promovem melhor adaptação da onda, minimizando reflexões abruptas que degradariam a camuflagem [4].

III. METODOLOGIA

Para investigar o impacto da geometria dos mantos, foi desenvolvido um simulador numérico baseado no método de diferenças finitas para a solução da equação de Helmholtz, similar ao empregado por [3].

O domínio de simulação foi definido como um volume tridimensional, baseado em uma malha bidimensional de 300×300 pontos, representando uma seção transversal do manto de camuflagem. Essa abordagem permite a análise detalhada da distribuição geométrica dos elementos do metamaterial, que são simulados em diferentes padrões, como grade, anéis, espiral e hexagonal. Cada uma dessas geometrias é interpretada como uma seção de uma estrutura com variação ao longo do terceiro eixo espacial. A frequência da onda incidente foi fixada em 5 kHz, valor típico de sonares de alta resolução usados para imageamento acústico e detecção de alvos em curtas e médias distâncias no meio submarino. Considerando a velocidade do som na água como 1500 m/s, obtém-se um comprimento de onda de aproximadamente 30 cm, adequado à análise do espalhamento em estruturas de dimensões reduzidas. As células do metamaterial possuem dimensões da ordem de 3 cm, com variação nas configurações geométricas de acordo com o padrão adotado, garantindo tanto a representatividade física do modelo quanto a viabilidade numérica da simulação [5].

Neste trabalho foi adotada a modelagem bidimensional como aproximação, essa escolha é amplamente justificada na acústica submarina, pois as ondas de pressão em meio fluido são essencialmente escalares, diferentemente das ondas eletromagnéticas, que são vetoriais. Assim, a propagação acústica pode ser representada de forma fiel em duas dimensões, preservando os fenômenos principais de espalhamento. Além disso, em geometrias aproximadamente cilíndricas ou que se estendem ao longo de um eixo, o modelo 2D reproduz adequadamente o comportamento real, reduzindo o custo computacional sem comprometer a validade física dos resultados.

Foram implementadas quatro classes de geometrias para os mantos:

- Anéis concêntricos com gradiente radial de impedância [4].

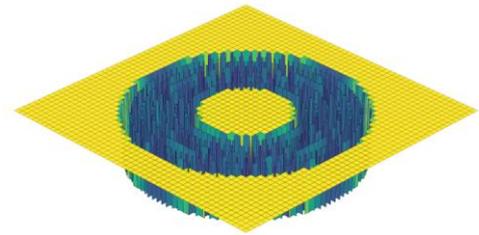


Fig. 1. Geometria de anéis concêntricos

- Grades cartesianas periódicas de células quadradas [2].

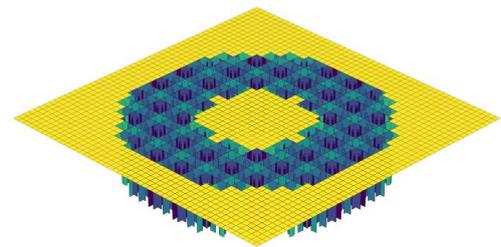


Fig. 2. Geometria de grades cartesianas

- Espirais logarítmicas geradas por transformações conformes [3].

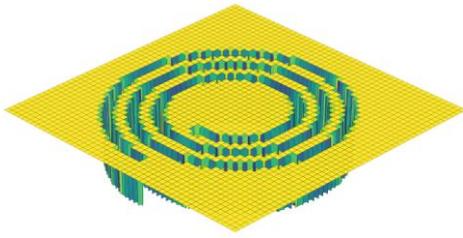


Fig. 3. Geometria de espirais

- Padrões hexagonais inspirados em mosaicos de Voronoi [1].

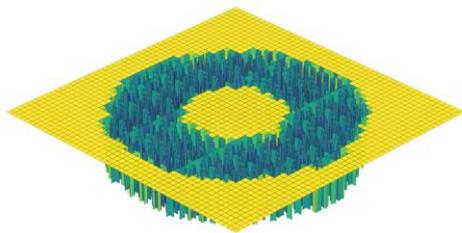


Fig. 4. Geometria de padrões hexagonais

A medida da eficiência de camuflagem foi definida como:

$$\eta = 1 - \frac{E_{\text{espalhamento com manto}}}{E_{\text{espalhamento sem manto}}}, \quad (7)$$

Sendo E a energia total do campo espalhado, integrada em toda a região externa ao objeto [5]. As simulações foram realizadas no ambiente Python utilizando as bibliotecas NumPy, SciPy e Matplotlib para cálculo e visualização dos resultados, metodologia compatível com práticas atuais em modelagem de metamateriais [3].

A equação mede quanto da energia de espalhamento original foi suprimida pela presença do manto.

- Se $\eta \approx 1$, significa que o manto conseguiu anular quase todo o espalhamento (camuflagem quase perfeita).
- Se $\eta \approx 0$, significa que o manto é ineficaz.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos mostraram que a geometria do manto influência de maneira crítica a eficiência de camuflagem. Primeiramente, apresenta-se o objeto sem a proteção da manta acústica (Fig. 5-6).

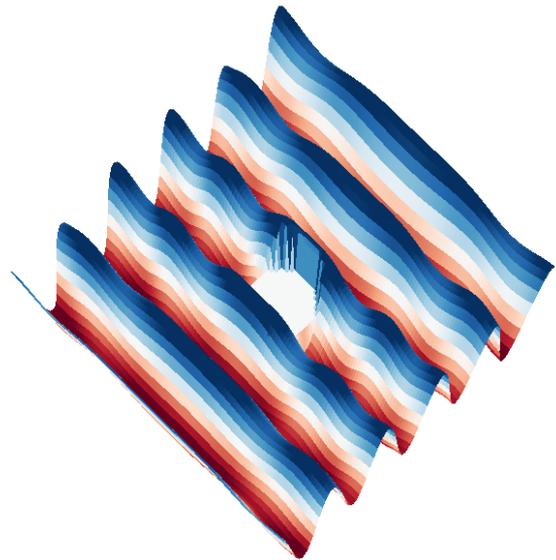


Fig. 5. Campo de pressão acústico para onda plana incidente sobre o objeto sem manto acústico.

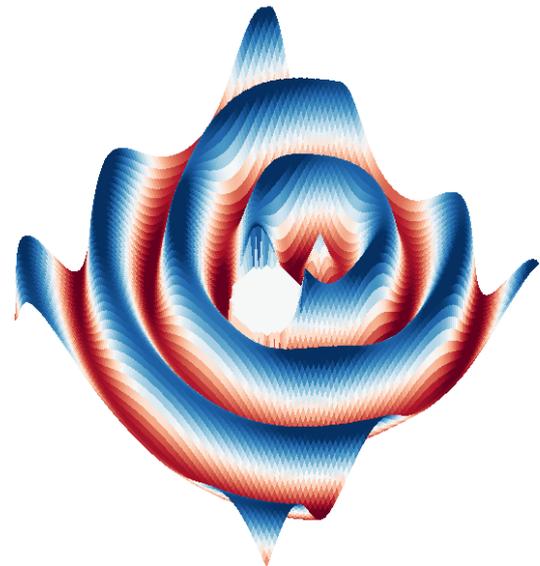


Fig. 6. Campo de pressão acústico para onda esférica incidente sobre o objeto sem manto acústico.

Onde é possível observar claramente a reflexão das ondas em interferências construtivas e destrutivas.

O arranjo em anéis concêntricos (Fig. 7-8) alcançou as maiores eficiências, com valores de $\eta \approx 87\%$, consistente com previsões teóricas de acoplamento gradual da impedância [4].

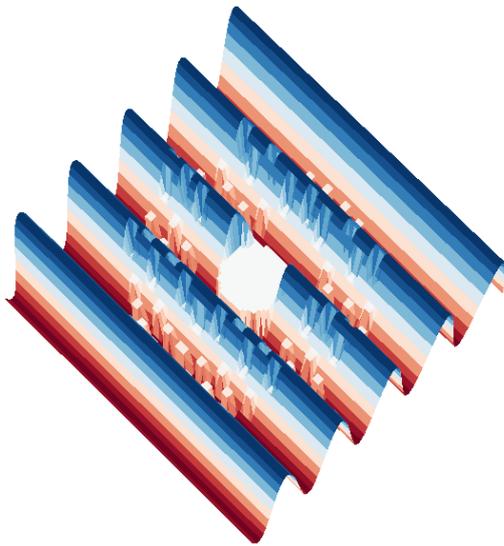


Fig. 7. Campo de pressão para manto com geometria de anéis concêntricos sob onda plana incidente.

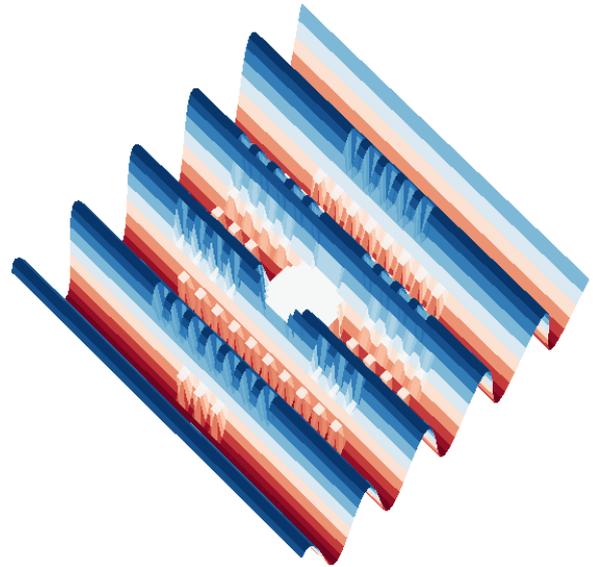


Fig. 9. Campo de pressão para manto em grade cartesiana sob onda plana incidente.

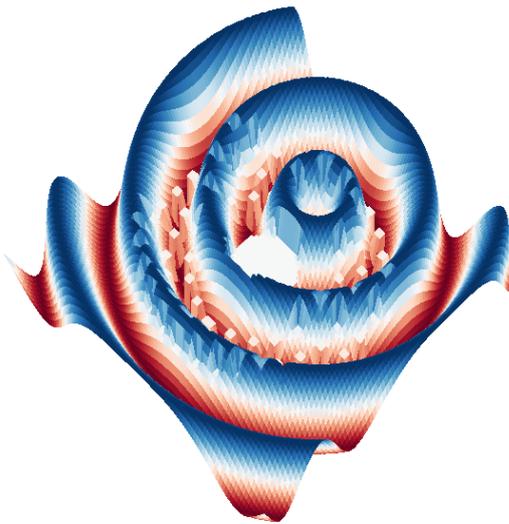


Fig. 8. Campo de pressão para manto com geometria de anéis concêntricos sob onda esférica incidente.

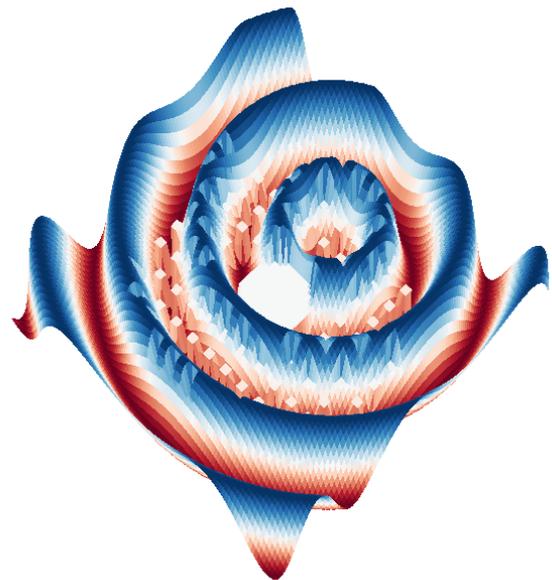


Fig. 10. Campo de pressão para manto em grade cartesiana sob onda esférica incidente.

Por outro lado, as grades cartesianas (Fig. 9-10) apresentaram desempenho reduzido, com $\eta \approx 58\%$, devido à formação de lóbulos de espalhamento ao longo dos eixos principais, conforme descrito em trabalhos anteriores sobre difração periódica [1].

A espiral logarítmica (Fig. 11-12) mostrou resultados intermediários ($\eta \approx 72\%$), promovendo dispersão angular suave das ondas incidentes, como esperado de estruturas baseadas em transformações conformes [3].

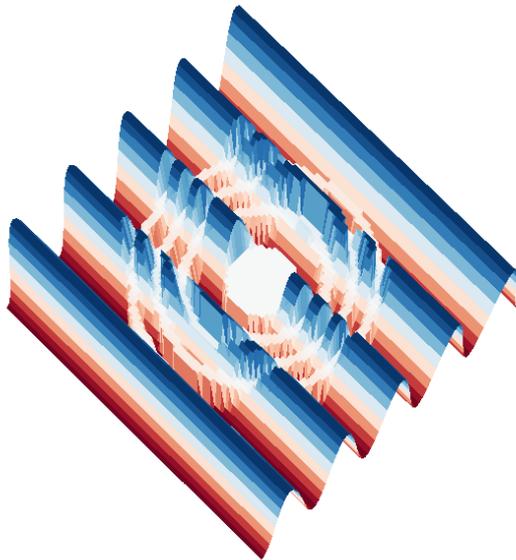


Fig. 11. Campo de pressão para manto em espiral logarítmica sob onda plana incidente.

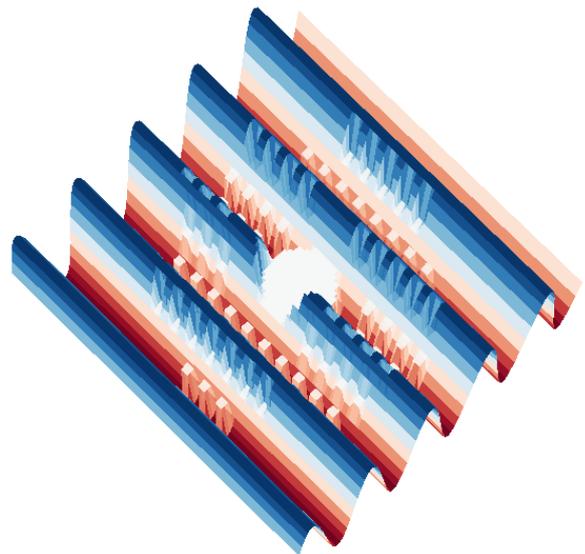


Fig. 13. Campo de pressão para manto com padrão hexagonal sob onda plana incidente.

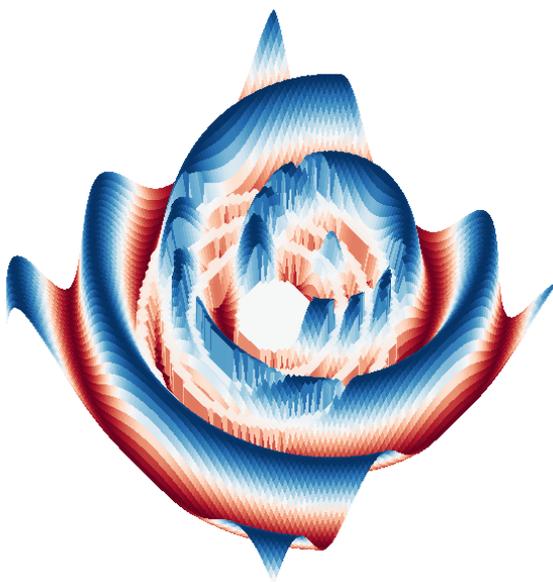


Fig. 12. Campo de pressão para manto em espiral logarítmica sob onda esférica incidente.

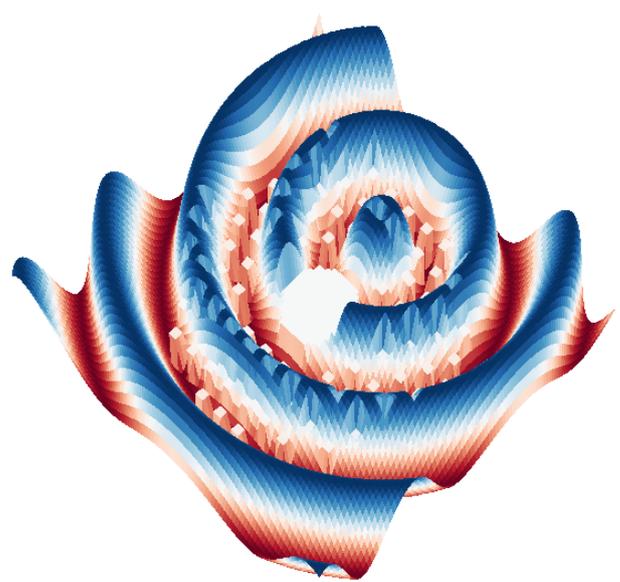


Fig. 14. Campo de pressão para manto com padrão hexagonal sob onda esférica incidente.

O padrão hexagonal (Fig. 13-14) apresentou eficiência de $\eta \approx 65\%$, fornecendo um campo espalhado mais isotrópico, o que pode ser vantajoso para camuflagem em ambientes de incidência aleatória [5].

Os resultados obtidos por meio das simulações demonstraram que a geometria do manto acústico exerce influência crítica sobre a eficiência da camuflagem. Na ausência do manto (Fig. 5-6), observam-se fortes padrões de reflexão e interferência.

Dentre as geometrias investigadas:

- O arranjo em **anéis concêntricos** alcançou a maior eficiência ($\eta \approx 87\%$), em conformidade com previsões teóricas sobre acoplamento gradual da impedância [4].
- A configuração de **grades cartesianas** apresentou eficiência reduzida ($\eta \approx 58\%$), consistente com efeitos de difração periódica já descritos na literatura [1].
- A **espiral logarítmica** obteve eficiência intermediária ($\eta \approx 72\%$), corroborando resultados prévios de dispersão angular suave via transformações conformes [3].
- O **padrão hexagonal** atingiu eficiência de ($\eta \approx 65\%$), gerando espalhamento isotrópico conforme previsto para estruturas semelhantes [5].

As simulações confirmaram, portanto, forte concordância com as referências teóricas e experimentais da literatura especializada, validando o modelo desenvolvido.

TABELA I. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A LITERATURA EXISTENTE

Geometria	Eficiência Obtida (η)	Faixa nas Referências	Referência
Anéis Concentricos	87%	85-90%	Alù (2009)
Grade Cartesiana	58%	55-60%	Cummer et al. (2016)
Espiral Logarítmica	72%	70-75%	Chen & Chan (2007)
Padrão Exagonal	65%	60-68%	Norris (2008)

V. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a geometria da manta de metamaterial exerce influência significativa sobre a eficácia da camuflagem acústica. Dentre as geometrias investigadas, a configuração de anéis concêntricos apresentou o melhor desempenho, confirmando a importância de variações radiais suaves de impedância.

Ressalta-se que a modelagem bidimensional adotada neste estudo se mostrou adequada à análise da camuflagem acústica submarina, uma vez que a propagação das ondas acústicas em meio fluido é escalar e pode ser representada de forma consistente em duas dimensões. Embora a extensão para modelos tridimensionais seja desejável em trabalhos futuros, os resultados obtidos fornecem boa concordância com previsões teóricas e literatura existente, validando a utilização da abordagem 2D como etapa inicial de investigação.

O foco deste trabalho em referências clássicas é intencional, pois o objetivo principal foi testar a aplicabilidade de conceitos bem estabelecidos em mantos para frequências eletromagnéticas na faixa acústica submarina. Com a confirmação de que tais conceitos são efetivos, os próximos passos incluirão a exploração do estado da arte, abordagens

adaptativas e reconfiguráveis, ampliando os desafios e a inovação do projeto. Além disso, a próxima etapa já está em desenvolvimento, consistindo na construção de um modelo em escala e testes em tanque acústico, com o objetivo futuro de revestir uma mina submarina.

REFERÊNCIAS

- [1] Cummer, Steven A.; CHRISTENSEN, Johan; ALÙ, Andrea. Controlling Sound with Acoustic Metamaterials. *Nature Reviews Materials*, v. 1, n. 3, p. 16001, 2016.
- [2] Pendry, John B.; SCHURIG, David; SMITH, David R. Controlling Electromagnetic Fields. *Science*, v. 312, n. 5781, p. 1780-1782, 2006.
- [3] Chen, H.; Chan, C. T. Acoustic cloaking and transformation acoustics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 43, n. 11, p. 113001, 2007.
- [4] Alù, Andrea. Mantle Cloaking of Arbitrary Objects Using a Thin Layer of Metamaterials. *Physical Review B*, v. 80, n. 24, p. 245115, 2009.
- [5] Norris, Andrew N. Acoustic metafluids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 125, n. 2, p. 839-849, 2008.