

PROJETO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE GEOMETRIAS DE MANTOS DE METAMATERIAIS PARA CAMUFLAGEM ACÚSTICA SUBMARINA¹

Design and computational simulation of metamaterial mantle geometries for underwater acoustic camouflage¹

Marco André Desbrousses Cotta¹

Resumo: A manipulação de ondas acústicas utilizando mantos de metamateriais representa uma abordagem promissora para a camuflagem sonora submarina. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador computacional para o projeto e a análise de diferentes geometrias de mantos, com o objetivo de reduzir o espalhamento acústico. Foram estudados arranjos em anéis concêntricos, grades cartesianas, espirais logarítmicas e padrões hexagonais, empregando a equação de Helmholtz modificada para meios heterogêneos. Os resultados mostraram que a geometria do manto exerce influência crítica na eficiência da camuflagem. O arranjo em anéis concêntricos apresentou o melhor desempenho, alcançando eficiência de aproximadamente 87%, enquanto as grades cartesianas obtiveram eficiência reduzida devido à formação de lóbulos de espalhamento. As espirais logarítmicas e os padrões hexagonais apresentaram desempenhos intermediários. As simulações confirmaram que os resultados obtidos estão em forte concordância com previsões teóricas disponíveis na literatura, validando a metodologia adotada. O estudo contribui para o avanço da engenharia de dispositivos de camuflagem acústica e abre caminho para futuras investigações em mantos adaptativos.

Palavras-chave: Metamateriais acústicos. Camuflagem submarina. Simulação numérica.

Abstract: The manipulation of acoustic waves using mantles of metamaterials represents a promising approach for underwater sound camouflage. This work presents the development of a computer simulator for the design and analysis of different mantle geometries, aimed at reducing acoustic scattering. Arrangements in concentric rings, Cartesian grids, logarithmic spirals and hexagonal patterns were studied, using the modified Helmholtz equation for heterogeneous media. The results showed that mantle geometry exerts a critical influence on camouflage efficiency. The concentric ring arrangement exhibited the best performance, achieving approximately 87% efficiency, while the Cartesian grids obtained reduced performance due to the formation of scattering lobes. The logarithmic spirals and hexagonal patterns showed intermediate performances. Simulations confirmed strong agreement with theoretical predictions available in the literature, validating the adopted methodology. The study contributes to the advancement of the engineering of acoustic camouflage devices and paves the way for future investigations into adaptive mantles.

Keywords: Acoustic metamaterials. Underwater camouflage. Numerical simulation.

¹ Encarregado da Divisão de Análise de Campo de Guerra Acústica no Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha, Rio de Janeiro, RJ – Brasil. E-mail: marco.cotta@marinha.mil.br

¹Artigo aceito e apresentado no XXVII Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa.

1. INTRODUÇÃO

O controle da propagação de ondas acústicas é um dos principais desafios no campo da física aplicada, com implicações diretas em tecnologias de comunicação, detecção e isolamento acústico (CUMMER *et al.*, 2016). A descoberta e o desenvolvimento de metamateriais — estruturas compostas que exibem propriedades físicas não encontradas em materiais naturais — revolucionaram as abordagens tradicionais, permitindo a manipulação de ondas de forma precisa (PENDRY *et al.*, 2006).

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 (CHEN; CHAN, 2007). 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, tornando-o indetectável (ALÛ, 2009).

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 (NORRIS, 2008). Estudos recentes sugerem que arranjos complexos podem produzir efeitos de interferência favoráveis à camuflagem, embora o entendimento completo desse fenômeno ainda esteja em desenvolvimento (CUMMER *et al.*, 2016).

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.

2. 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 (Equação 1):

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

Onde:

$P(r)$: amplitude complexa da pressão acústica; e
 $k(r)$: número de onda local, dependente da posição (CHEN; CHAN, 2007).

Em metamateriais acústicos, a variação espacial de propriedades efetivas, como densidade $\rho(r)$ e módulo de compressibilidade $K(r)$, altera a relação de dispersão (Equação 2):

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

Onde:

ω : frequência angular da onda (NORRIS, 2008).

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 Equação 3:

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

conforme derivado nos trabalhos de Alù (2009).

Idealmente, o manto deve gerar um campo espalhado P_{sc} que cancele o espalhamento produzido pelo objeto. Esse objetivo pode ser formalizado como um problema de otimização (Equação 4):

$$\min_{Z_s} \left(\int_{\Omega} |P_{sc}|^2 d\Omega \right) \quad (4)$$

Onde:

Ω : região de interesse no espaço (CUMMER *et al.*, 2016).

Além disso, variações suaves e contínuas de impedância promovem melhor adaptação da onda, minimizando reflexões abruptas que degradariam a camuflagem (NORRIS, 2008).

3. 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 Chen e Chan (2007).

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, e arranjos em 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 1.500 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 (NORRIS, 2008).

Foram implementadas quatro classes de geometria para os mantos:

- » Anéis concêntricos com gradiente radial de impedância (Figura 1) (ALÛ, 2009);
- » Grades cartesianas periódicas de células quadradas (Figura 2) (PENDRY *et al.*, 2006);

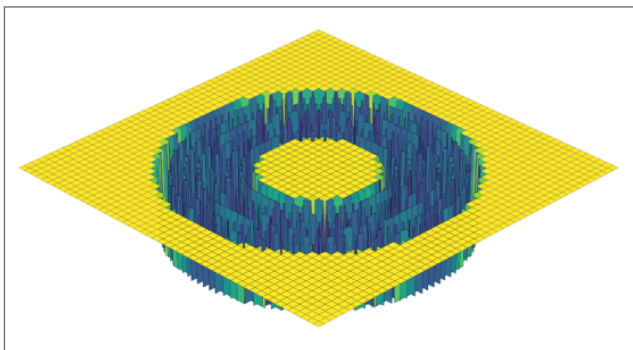


Figura 1. Geometria de anéis concêntricos.

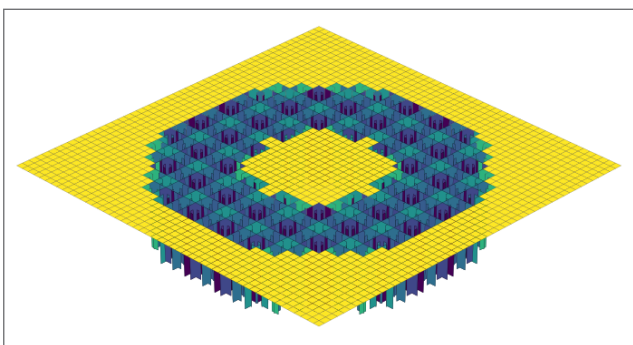


Figura 2. Geometria de grades cartesianas.

- » Espirais logarítmicas geradas por transformações conformes (Figura 3) (CHEN; CHAN, 2007);
- » Padrões hexagonais inspirados em mosaicos de Voronoi (Figura 4) (CUMMER *et al.*, 2016).

A medida de eficiência de camuflagem foi definida como (Equação 5):

$$\eta = 1 - \frac{E_{\text{espalhamento com manto}}}{E_{\text{espalhamento sem manto}}} \quad (5)$$

Onde:

E: energia total do campo espalhado, integrada em toda a região externa ao objeto (NORRIS, 2008).

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 (CHEN; CHAN, 2007).

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);

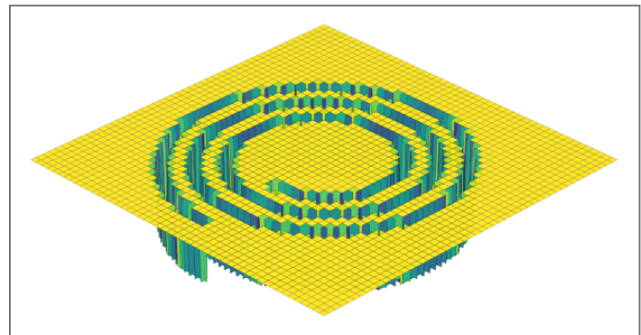


Figura 3. Geometria de espirais.

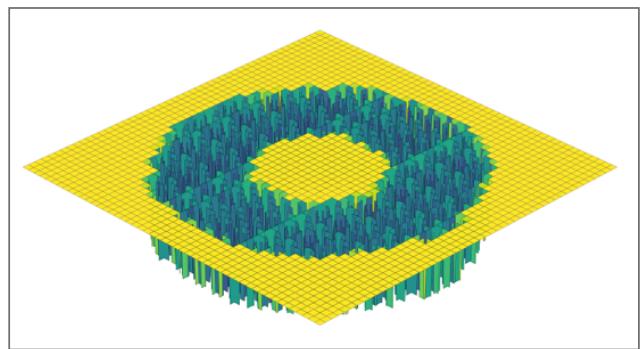


Figura 4. Geometria de padrões hexagonais.

- » Se $\eta \approx 0$, significa que não houve melhora (manto ineficaz).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

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

O arranjo em anéis concêntricos (Figuras 7 e 8) alcançou as maiores eficiências, com valores de $\eta \approx 87\%$, consistentes com previsões teóricas de acoplamento gradual da impedância (ALÛ, 2009).

Por outro lado, as grades cartesianas (Figuras 9 e 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 (CUMMER *et al.*, 2016).

A espiral logarítmica (Figuras 11 e 12) mostrou resultados intermediários ($\eta \approx 72\%$), promovendo dispersão angular suave das ondas incidentes, como esperado de estruturas baseadas em transformações conformes (CHEN; CHAN, 2007).

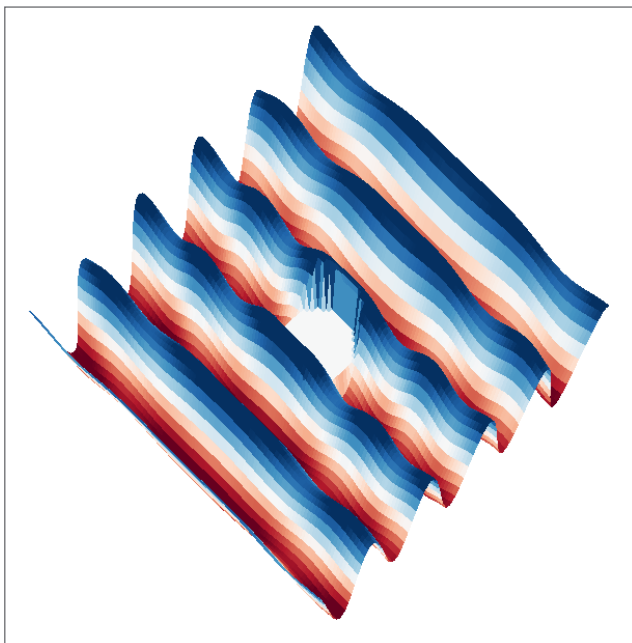


Figura 5. Campo de pressão acústico para onda plana incidente sobre o objeto sem manto acústico.

O padrão hexagonal (Figuras 13 e 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 (NORRIS, 2008).

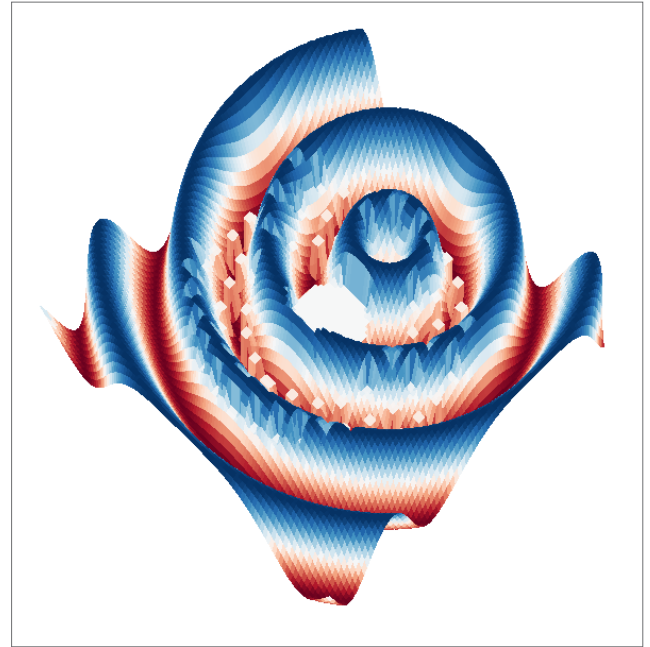


Figura 6. Campo de pressão acústico para onda esférica incidente sobre o objeto sem manto acústico.

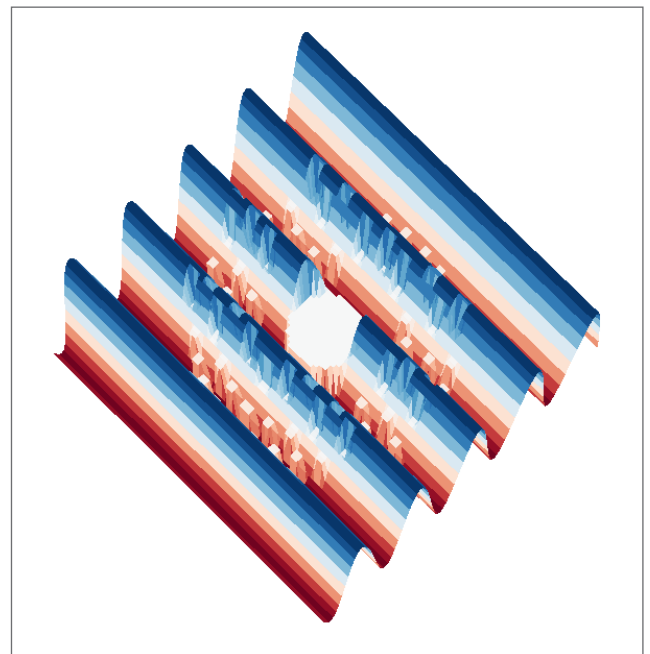


Figura 7. Campo de pressão para manto com geometria de anéis concêntricos sob onda plana incidente.

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 (Figuras 5 e 6), observam-se fortes padrões de reflexão e interferência.

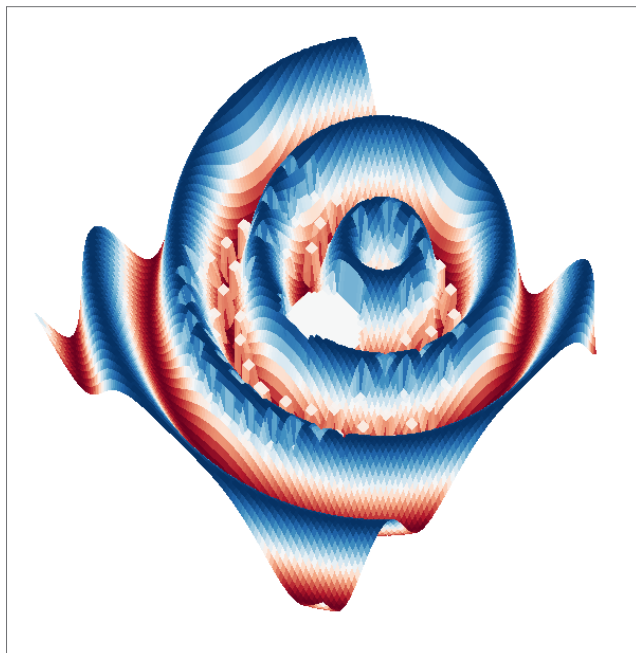


Figura 8. Campo de pressão para manto com geometria de anéis concêntricos sob onda esférica incidente.

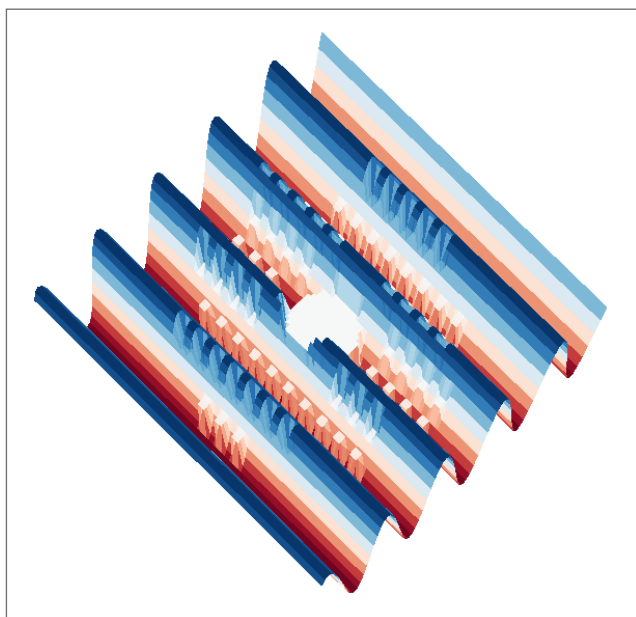


Figura 9. Campo de pressão para manto em grade cartesiana sob onda plana incidente.

Dentre as geometrias investigadas (Quadro 1):

- » O arranjo em anéis concêntricos alcançou a maior eficiência ($\eta \approx 87\%$), em conformidade com previsões teóricas sobre acoplamento gradual da impedância (ALÛ, 2009);

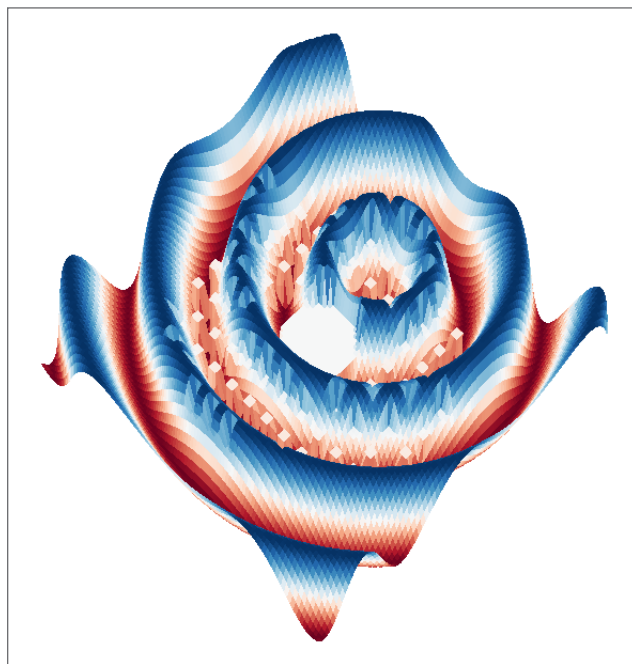


Figura 10. Campo de pressão para manto em grade cartesiana sob onda esférica incidente.

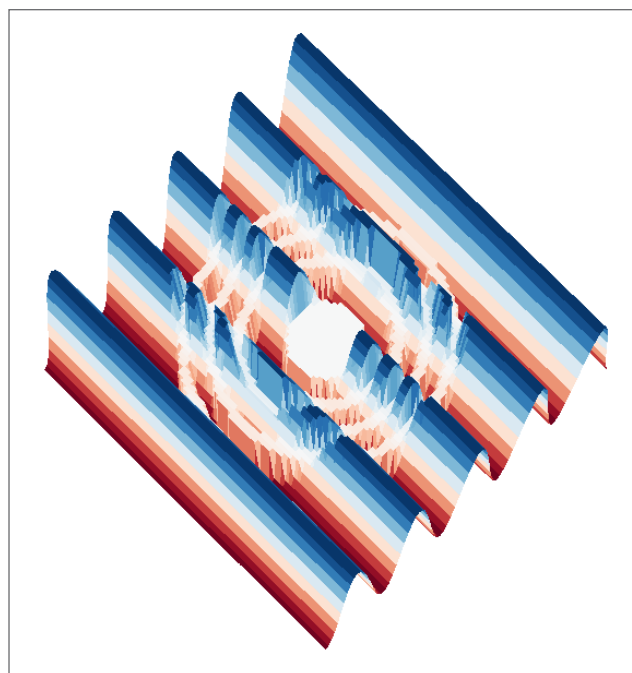


Figura 11. Campo de pressão para manto em espiral logarítmica sob onda plana incidente.

- » A configuração de grades cartesianas apresentou eficiência reduzida ($\eta \approx 58\%$), consistente com efeitos de difração periódica já descritos na literatura (CUMMER *et al.*, 2016).
- » A espiral logarítmica obteve eficiência intermediária ($\eta \approx 72\%$), corroborando resultados prévios de dispersão angular suave via transformações conformes (CHEN; CHAN, 2007).

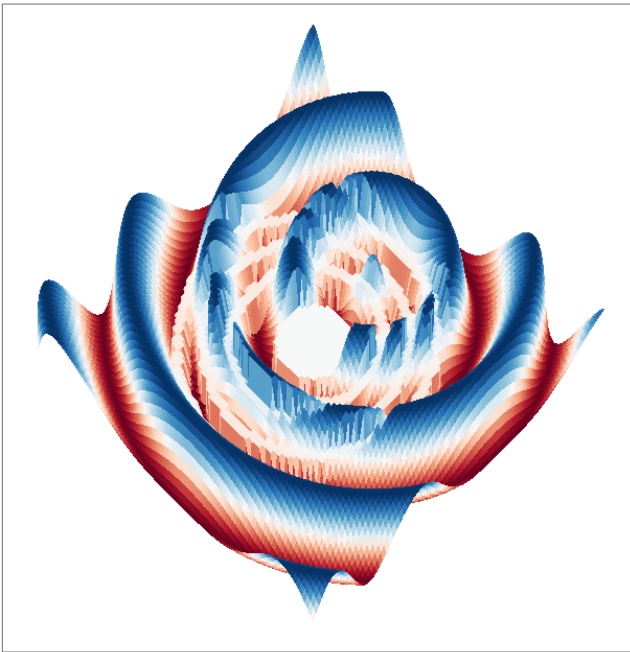


Figura 12. Campo de pressão para manto em espiral logarítmica sob onda esférica incidente.

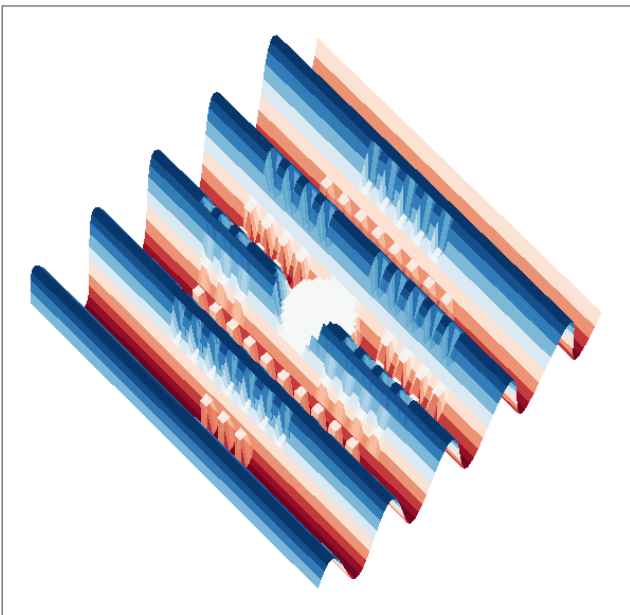


Figura 13. Campo de pressão para manto com padrão hexagonal sob onda plana incidente.

- » O padrão hexagonal atingiu eficiência de $\eta \approx 65\%$, gerando espalhamento isotrópico conforme previsto para estruturas semelhantes (NORRIS, 2008).

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

5. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a geometria da manta de metamaterial exerce influência significativa sobre a eficácia

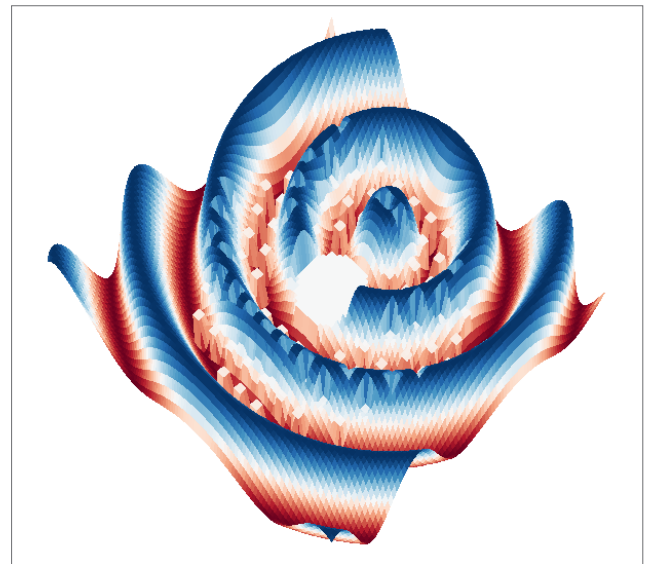


Figura 14. Campo de pressão para manto com padrão hexagonal sob onda esférica incidente.

Quadro 1. Comparação dos resultados obtidos com a literatura existente.

Geometria	Eficiência Alcançada (η) %	Valores Reportados %	Referência
Anéis Concêntricos	87	85-90	Alù (2009)
Grade Cartesiana	58	55-60	Cummer <i>et al.</i> (2016)
Aspiral Logarítmica	72	70-75	Chen e Chan (2007)
Padrão Hexagonal	65	60-68	Norris (2008)

da camuflagem acústica. Entre as geometrias investigadas, a configuração de anéis concêntricos apresentou o melhor desempenho, confirmando a importância de variações radiais suaves de impedância (ALÛ, 2009).

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, bem como de 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 na realização de testes em tanque acústico, com o objetivo futuro de revestir uma mina submarina.

REFERÊNCIAS

ALÛ, A. Mantle cloaking of arbitrary objects using a thin layer of metamaterials. *Physical Review B*, v. 80, n. 24, p. 245115, 2009.

CHEN, H.; CHAN, C.T. Acoustic cloaking and transformation acoustics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 43, 113001, 2007. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/11/113001>

CUMMER, S. A.; CHRISTENSEN, J.; ALÛ, A. Controlling sound with acoustic metamaterials. *Nature Reviews Materials*, v. 1, n. 3, 16001,

2016. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.1>

NORRIS, A. N. Acoustic metafluids. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 125, p. 839-849, 2008. <https://doi.org/10.1121/1.3050288>

PENDRY, J. B.; SCHURIG, D.; SMITH, D. R. Controlling electromagnetic fields. *Science*, v. 312, n. 5781, p. 1780-1782, 2006. <https://doi.org/10.1126/science.1125907>