REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

ESTRUTURAS HÍBRIDAS METAL-POLÍMERO EM METAMATERIAIS ABSORVEDORES ACÚSTICOS SUBMARINOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

METAL-POLYMER HYBRID STRUCTURES IN UNDERWATER ACOUSTIC ABSORBING METAMATERIALS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

ESTRUCTURAS HÍBRIDAS METAL-POLÍMERO EN METAMATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS SUBMARINOS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

Rodolfo Lopes Gonçalves
Mestrando em Acústica Submarina, Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), Brasil
E-mail: rodolflopesg@gmail.com

Renato Peres Vio
Doutor (Ph.D.), Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), Brasil

Wendel Quintana Freitas de Lima
Mestre, Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP), Brasil

Resumo

Este estudo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o emprego conjunto de componentes metálicos e poliméricos em metamateriais absorvedores acústicos submarinos. Os resultados evidenciaram uma diversidade de configurações estruturais, abrangendo tanto inclusões metálicas em matrizes poliméricas quanto configurações nas quais os componentes metálicos desempenham função predominantemente estrutural. De modo geral, os polímeros estiveram associados ao casamento de impedância acústica e à dissipação de energia por perdas viscoelásticas. Os metais, por sua vez, foram empregados como elementos estruturais, fronteiras rígidas, inclusões para aumento de densidade e componentes ressonantes. Também foram identificados trabalhos que abordaram condições relevantes para aplicações submarinas, como os efeitos da pressão hidrostática e da incidência oblíqua sobre o desempenho acústico das estruturas. Em conjunto, os resultados indicam que a combinação entre metais e polímeros oferece diferentes possibilidades de projeto de metamateriais acústicos submarinos, permitindo explorar distintos mecanismos de absorção.

Palavras-chave: Dissipação viscoelástica; Absorção sonora; Revestimentos acústicos.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

Abstract

This study presents a systematic literature review on the combined use of metallic and polymeric components in underwater acoustic absorbing metamaterials. The results revealed a diversity of structural configurations, encompassing both metallic inclusions embedded in polymer matrices and configurations in which metallic components play a predominantly structural role. In general, polymers were associated with acoustic impedance matching and energy dissipation through viscoelastic losses. Metals, in turn, were employed as structural elements, rigid boundaries, density-enhancing inclusions, and resonant components. Studies addressing relevant conditions for underwater applications were also identified, including the effects of hydrostatic pressure and oblique incidence on the acoustic performance of these structures. Overall, the findings indicate that the combination of metals and polymers offers different design possibilities for underwater acoustic metamaterials, enabling the exploration of distinct absorption mechanisms.

Keywords: Viscoelastic dissipation; Sound absorption; Acoustic coatings.

Resumen

Este estudio presenta una revisión sistemática de la literatura sobre el uso conjunto de componentes metálicos y poliméricos en metamateriales absorbentes acústicos submarinos. Los resultados revelaron una diversidad de configuraciones estructurales, que abarcan tanto inclusiones metálicas en matrices poliméricas como configuraciones en las que los componentes metálicos desempeñan una función predominantemente estructural. En general, los polímeros estuvieron asociados con la adaptación de impedancia acústica y la disipación de energía mediante pérdidas viscoelásticas. Los metales, por su parte, se emplearon como elementos estructurales, fronteras rígidas, inclusiones para aumentar la densidad y componentes resonantes. También se identificaron trabajos que abordaron condiciones relevantes para aplicaciones submarinas, como los efectos de la presión hidrostática y de la incidencia oblicua sobre el rendimiento acústico de las estructuras. En conjunto, los resultados indican que la combinación de metales y polímeros ofrece diferentes posibilidades para el diseño de metamateriales acústicos submarinos, permitiendo explorar distintos mecanismos de absorción.

Palabras clave: Disipación viscoelástica; Absorción sonora; Recubrimientos acústicos.

1. Introdução

A denominação “metamaterial” deriva do prefixo grego meta, associado à ideia de “além” ou “para além” (Goyal, 2025). Em termos gerais, metamateriais podem ser compreendidos como materiais constituídos por componentes naturais, mas organizados a partir de estruturas artificiais concebidas por projeto, capazes de produzir propriedades que extrapolam aquelas usualmente encontradas na natureza (Sun; Zhou, 2025). De forma análoga aos materiais convencionais, em que as propriedades derivam, em grande parte, dos átomos e moléculas constituintes, os metamateriais apresentam propriedades efetivas associadas, em grande medida, à arquitetura estrutural de uma célula unitária artificialmente projetada, denominada meta-átomo (Sun; Zhou, 2025).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

Essas estruturas podem ser classificadas de acordo com o tipo de propriedade que sua arquitetura busca modificar ou controlar, compreendendo, entre outras, classes de natureza mecânica, térmica, óptica e acústica (Fischer; Hillen; Eberl, 2020). No campo da acústica submarina[1], os metamateriais podem ser compreendidos a partir de diferentes estratégias centrais de controle sonoro, entre elas a absorção da energia acústica incidente, o impedimento da transmissão do ruído estrutural para a água e o redirecionamento do percurso de propagação das ondas sonoras (Zhu *et al*., 2022).

Entre essas estratégias, o desempenho dos metamateriais absorvedores está associado à combinação entre baixa reflexão superficial e elevada dissipação interna da energia acústica incidente (Zhu *et al*., 2022). Essa classe de materiais apresenta potencial para contornar limitações comuns dos absorvedores submarinos convencionais, especialmente a baixa capacidade de absorção em baixas frequências e a redução do desempenho sob pressão hidrostática (Zhu *et al*., 2022).

Uma das abordagens exploradas no desenvolvimento de materiais absorvedores consiste na combinação de componentes com propriedades distintas, estratégia também observada no domínio eletromagnético. Murugesan *et al*. (2021) descrevem, por exemplo, um absorvedor de radiação eletromagnética composto por esferas de ferro carbonila dispersas em uma matriz de resina epóxi, no qual parte da energia incidente é dissipada na forma de calor. De maneira análoga, no campo da acústica submarina, essa estratégia também tem sido explorada no desenvolvimento de metamateriais absorvedores. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar as principais configurações estruturais propostas na literatura e compreender as funções desempenhadas por seus componentes nos mecanismos de absorção acústica.

[1] Neste trabalho, o termo “submarina” é empregado para designar ambientes e condições de submersão em água, independentemente de sua salinidade, não se restringindo ao ambiente marinho.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

2. Metodologia

A metodologia empregada nesta pesquisa baseia-se nas orientações para a condução de revisões sistemáticas da literatura apresentadas por Costa e Zoltowski (2014). Além disso, o estudo caracteriza-se como exploratório e descritivo, com abordagem qualitativa. Embora sejam considerados dados quantitativos, como coeficientes de absorção e faixas de frequência reportados pelos autores dos estudos selecionados, o núcleo da pesquisa consiste na síntese e na interpretação comparativa das funções e configurações dos metamateriais analisados.

Com base nas orientações apresentadas por Costa e Zoltowski (2014), a condução e a estruturação deste estudo foram organizadas em oito etapas básicas: delimitação da questão de pesquisa; escolha das fontes de dados; definição das palavras-chave utilizadas nas buscas; busca e armazenamento dos resultados; seleção dos artigos de acordo com os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos; extração dos dados dos artigos selecionados; avaliação dos artigos; e, por fim, síntese e interpretação dos dados (Costa; Zoltowski, 2014).

A primeira etapa, referente à delimitação da questão de pesquisa, considerou que a associação entre componentes metálicos e poliméricos já é explorada no desenvolvimento de materiais absorvedores no domínio eletromagnético. A partir dessa referência, buscou-se investigar como essa abordagem tem sido empregada no campo da acústica submarina, estabelecendo-se a seguinte pergunta norteadora: “De que formas estruturas híbridas metal–polímero têm sido exploradas no desenvolvimento de metamateriais absorvedores acústicos submarinos?”.

Embora as bases conceituais dos metamateriais remontem à década de 1960, com os estudos do cientista soviético Victor G. Veselago no campo do eletromagnetismo (Veselago, 1968), no campo da acústica um dos marcos iniciais foi o trabalho de Liu *et al*. (2000), apontado na literatura como uma das primeiras contribuições nesse domínio (Liu *et al*., 2000; Ranjbar; Bayer, 2024). Com base nesse marco, o recorte temporal adotado para a busca dos artigos compreendeu o período entre 2000 e 2026.

No que se refere aos termos de busca, foram utilizados os descritores *underwater*, *metamaterial* e *absorber*, combinados pelo operador booleano “AND”.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

As buscas foram realizadas em 30 de agosto de 2026 com atualização em 10 de novembro de 2026 nas bases de dados SciELO e Scopus e no Portal de Periódicos CAPES. Como critérios de inclusão, foram considerados estudos que investigassem estruturas híbridas metal-polímero destinadas à absorção acústica submarina, tanto aquelas explicitamente denominadas metamateriais pelos autores quanto aquelas artificialmente projetadas cujas propriedades acústicas resultassem da associação e da organização de seus componentes constituintes. Adicionalmente, os estudos deveriam apresentar resultados de desempenho acústico obtidos por abordagens teóricas, numéricas ou experimentais.

Como critérios de exclusão, foram considerados estudos de editorial, revisão, análises, capítulos de livro, artigos que não fossem de acesso aberto (*open access*), trabalhos duplicados, estudos que, após a análise do título, resumo ou texto completo, não investigassem a absorção acústica submarina ou que não declarassem explicitamente o uso de componentes metálicos e poliméricos na configuração investigada. Além disso, foram excluídos estudos que não esclarecessem o papel físico dos componentes metálicos e das estruturas à base de polímeros, quando empregados no controle de ondas acústicas.

Os estudos selecionados foram distribuídos em dois clusters. O primeiro cluster reúne artigos que abordam inclusões metálicas em matrizes poliméricas, enquanto o segundo compreende estudos nos quais o componente metálico desempenha função predominantemente estrutural. Os procedimentos de busca bibliográfica estão sintetizados na Tabela 1, enquanto as etapas de seleção dos estudos são apresentadas no fluxograma da Figura 1.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

Tabela 1: Síntese dos procedimentos de busca bibliográfica.

Fonte	Data da busca	Expressão de busca	Campos pesquisados	Filtros aplicados
Scopus	10/11/2026	underwater AND metamaterial AND absorber	Título, resumo e palavras-chave (Article title, Abstract, Keywords)	Publicação: 2000 até Present; Acesso aberto: Todo o acesso é livre; Tipo de documento: Artigo
Portal CAPES	10/11/2026	underwater AND metamaterial AND absorber	Escopo da Busca: Buscar tudo; consulta em qualquer campo (contém)	Período: 2000–2026; Acesso aberto: Sim; Tipo de recurso: Artigo
SciELO	10/11/2026	underwater AND metamaterial AND absorber	Todos os índices	Publicação: 2000–2026; todos os idiomas, coleções, periódicos e áreas temáticas

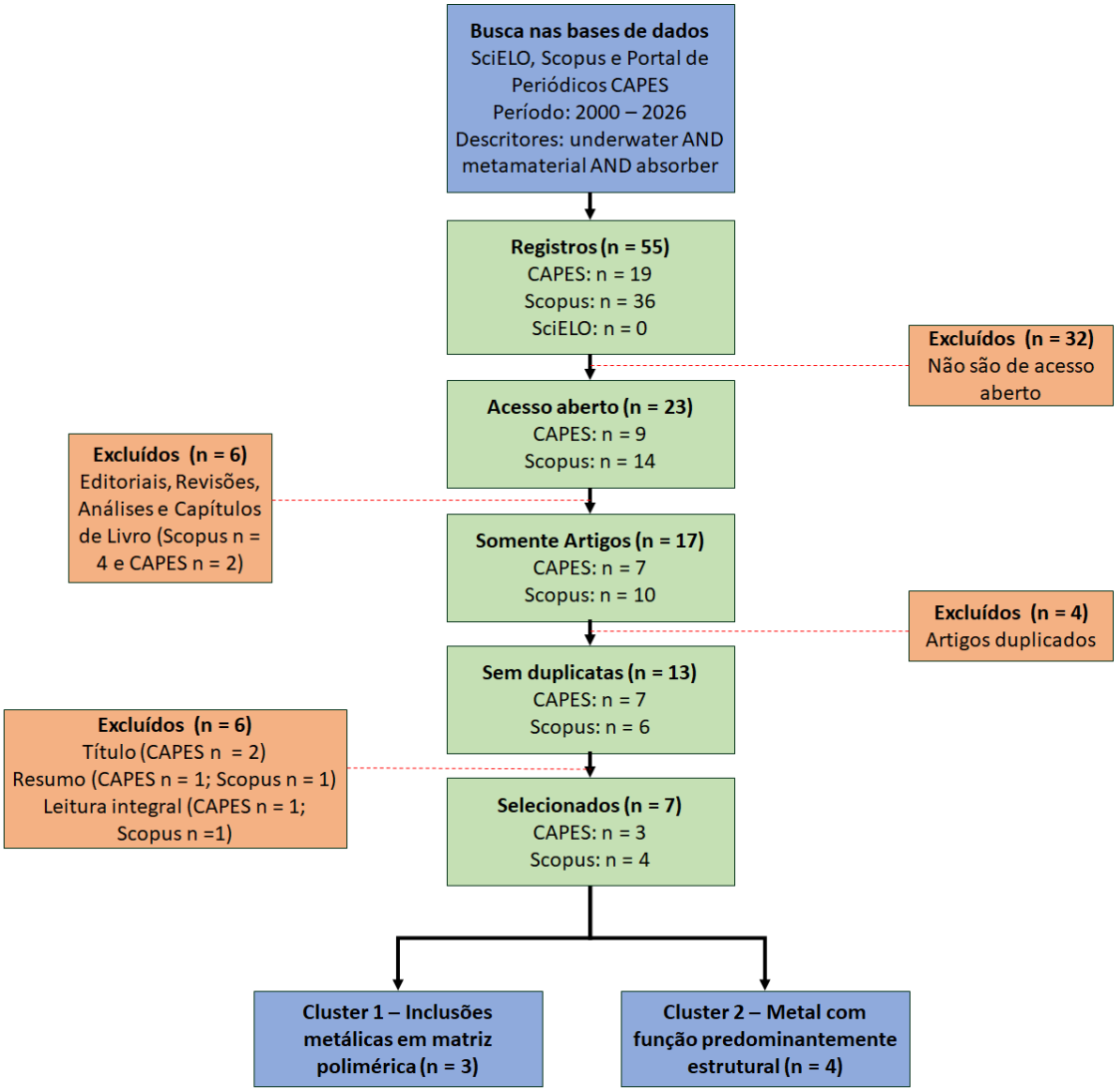
Fonte: Elaboração própria (2026).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

Figura 1: Fluxograma de seleção dos artigos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A busca inicial identificou 55 estudos, entretanto somente 23 correspondiam a documentos de acesso aberto. Após a remoção de editoriais, revisões, análises e capítulos de livros, 6 trabalhos foram excluídos, restando 17 artigos sendo 10 provenientes da Scopus e 7 do Portal de Periódicos CAPES. Em seguida, 4 artigos duplicados foram removidos, reduzindo o número de estudos para 13. A leitura dos títulos resultou na exclusão de 2 artigos e, posteriormente, a análise dos resumos levou à exclusão de outros 2, em ambas as etapas, com base nos critérios de elegibilidade previamente estabelecidos. Após a leitura integral dos textos, 2 artigos foram excluídos, o primeiro por não reportar explicitamente o uso de metal como

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

componente da estrutura apresentada e o segundo por não detalhar a função dos metais empregados, bem como das estruturas poliméricas no controle das ondas acústicas. Dessa forma, 7 artigos foram selecionados para análise e, para estes, foram comparados os materiais constituintes, as faixas de frequência investigadas e os coeficientes de absorção acústica reportados pelos autores. Embora excluído do conjunto de estudos selecionados, o trabalho de Wang *et al.* (2016) merece destaque por investigar uma estrutura artificialmente projetada para absorção acústica submarina. Dada sua pertinência temática, o estudo é apresentado a seguir, em caráter complementar, sem integrar o conjunto dos sete artigos selecionados.

3. Revisão da Literatura

Entre os trabalhos discutidos, o estudo de Wang *et al.* (2016) é o mais antigo e apresenta características também observadas nas pesquisas posteriores, como a utilização de modelos teóricos, simulações pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), investigação de diferentes geometrias e dissipação de energia por perdas viscoelásticas. No estudo, os autores propõem um absorvedor capaz de reduzir a reflexão das ondas acústicas incidentes por meio de absorção. Além disso, a principal ideia sustentada pelos mesmos, baseia-se no aumento do trajeto percorrido pelos raios sonoros no interior de um material capaz de apresentar perdas viscoelásticas, como a borracha, por exemplo. Como a atenuação é fortemente dependente da distância percorrida pela onda acústica, o aumento nesse trajeto implica em um aumento da dissipação. Para obter esse efeito, os autores exploraram a curvatura das trajetórias dos raios acústicos causada pela existência de um gradiente de velocidade do som, tendo esse comportamento sido teoricamente demonstrado por meio da teoria do traçado de raios em conjunto com a lei de Snell-Descartes (Wang *et al.*, 2016). O estudo analisou a faixa de frequência entre 0 e 30 kHz, e o dispositivo absorvedor foi apresentado em duas geometrias, a circular e a semicircular. Ambas as propostas foram comparadas com duas outras abordagens tradicionais, sendo elas o revestimento de Alberich, que consiste em uma matriz de borracha com cavidades de ar, e o revestimento homogêneo de borracha.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

Os resultados obtidos demonstraram que o absorvedor circular apresentou menor reflexão das ondas incidentes se comparado ao revestimento homogêneo entre 5 e 25 kHz, e ao revestimento de Alberich entre 10 e 30 kHz. No que se refere ao dispositivo semicircular, este apresentou menor reflexão do que o dispositivo circular em todas as frequências entre 10 e 30 kHz. Embora os autores não mencionem explicitamente o uso de componentes metálicos, há a utilização, nas simulações, de um substrato rígido, solução também observada em outros estudos desta revisão, nos quais componentes metálicos desempenham esse papel. Além disso, os autores não denominam explicitamente o absorvedor como metamaterial, embora sua arquitetura apresente características compatíveis com abordagens usualmente discutidas no contexto de metamateriais acústicos.

Inclusões metálicas em matriz polimérica

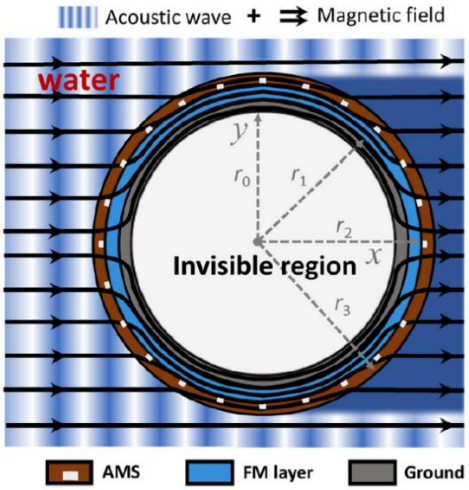
Com características aplicáveis a dois ramos da física, Zhou et al. (2020) investigaram um metamaterial capaz de atuar tanto no domínio do magnetismo quanto no da acústica. No que se refere ao magnetismo, a principal abordagem foi o uso de uma matriz de PDMS (polidimetilsiloxano) com inclusões de ferro hidroxilado (*hydroxyl iron*), denominada FM (*ferromagnetic*), disposta sobre a superfície externa de uma casca cilíndrica de latão. A região interna dessa casca corresponde à região destinada à ocultação, conforme ilustrado na Figura 2. Nessa configuração, as linhas de campo magnético contornam a estrutura e, em seguida, restauram sua direção, produzindo uma perturbação muito pequena no campo externo (Zhou *et al.*, 2020). Para verificar a eficácia desse revestimento, os autores utilizaram um detector de metais e examinaram a amostra em uma frequência de 25 kHz, comparando-a com uma amostra de referência não revestida. Os resultados demonstraram que a referência não revestida disparou o "*beep*" do sensor, enquanto a amostra com revestimento não foi detectada.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

Figura 2: Revestimento bifísico composto por AMS, camada FM e base rígida de latão (*ground*).



Fonte: Zhou *et al.* (2020). Reproduzido sob licença CC BY 4.0.

Em relação à absorção acústica, o material utilizado foi PDMS com cavidades cilíndricas periódicas de ar, denominado AMS (*acoustic metasurface*), associado à matriz FM anteriormente mencionada. O mecanismo de absorção ocorre predominantemente por perdas viscosas, além disso, a redução da reflexão é favorecida pela compensação entre a onda refletida pelo fundo rígido de latão, com deslocamento de fase aproximadamente nulo, e aquela refletida pela AMS ressonante, com deslocamento de fase próximo de 180° (Zhou *et al.*, 2020). Dentre as configurações investigadas pelos autores, destacam-se dois revestimentos de AMS com cavidades de diferentes dimensões, sendo um deles otimizado para absorver na frequência de aproximadamente 100 kHz e o outro na faixa de megahertz. No primeiro caso, os resultados analítico-numéricos indicaram um pico de absorção de 0,96. No segundo, os resultados numéricos indicaram dois modos fundamentais de ressonância, em 0,78 e 1,42 MHz, e sugerem coeficientes de absorção próximos da unidade, embora o valor máximo não tenha sido explicitamente reportado.

Segundo Zhou *et al.* (2020), os experimentos voltados à acústica foram realizados em tanque de água, utilizando um transdutor com frequência central nominal de 100 kHz. Foram avaliadas duas amostras revestidas pelo conjunto AMS/FM, sendo elas uma placa e um cilindro, ambos de latão. A análise dos autores, acerca dos dados obtidos pelo experimento, apontou expressiva redução da reflexão

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

acústica em ambos os casos, sendo praticamente nula no primeiro. Um segundo experimento foi realizado na faixa de megahertz, utilizando um transdutor com frequência central de 1 MHz. Nesse caso a AMS, otimizada para essa faixa de frequência, também foi aplicada sobre a placa e o cilindro de latão. Para a placa, foi reportada reflexão acústica praticamente nula em 1,26 MHz, com desempenho semelhante observado no cilindro.

Os autores explicam que o metamaterial proposto apresentou eficácia na redução da detecção magnética e acústica após os experimentos. Além disso, destacam que o projeto da AMS pode ser reescalonado, deslocando sua faixa de operação para o espectro ultrassônico, com possível aplicação médica, ou para frequências de quilohertz ou inferiores, visando aplicações anti-sonar em contexto militar (Zhou *et al.*, 2020). Embora o artigo descreva o uso de metal disperso em matriz polimérica, observou-se que, nesse caso específico, a inclusão metálica era voltada para o campo magnético e não efetivamente para ondas acústicas/mecânicas, sendo o papel do metal na resposta acústica observado principalmente na atuação do fundo rígido de latão em conjunto com a camada de AMS.

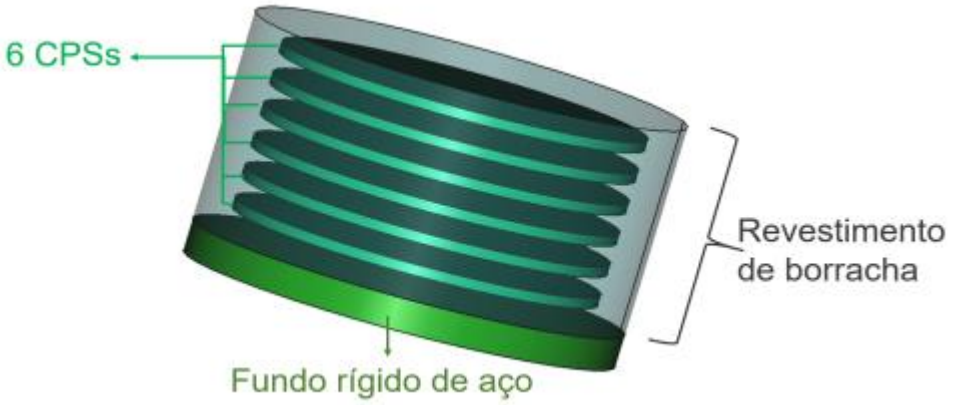
Diferentemente dos autores anteriores, Zhang e Cheng (2021) propuseram um metamaterial em que as inclusões metálicas, voltadas para o domínio acústico, foram inseridas diretamente na matriz polimérica. As inclusões de aço consistiam nos denominados *circular plate scatterers* (CPSs), os quais foram dispostos em 6 unidades no interior de uma matriz de borracha, sendo a estrutura posteriormente apoiada sobre uma base metálica, também de aço. O esquema da configuração prototipada pelos autores é apresentado na Figura 3. Em conjunto, esses elementos geram ressoadores locais, contínuos e de banda larga, favorecendo modos de ressonância locais e acoplados e levando, assim, a uma elevada absorção sonora em uma faixa de baixas frequências (Zhang; Cheng, 2021). No que se refere à absorção obtida experimentalmente, os autores reportaram valor médio superior a 0,82 na faixa de frequências de 800 Hz a 6 kHz, com absorção de 0,94 em 1 kHz.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

Figura 3: Representação tridimensional do meta-absorvedor de Zhang e Cheng (2021).



Fonte: Elaboração própria, com base em Zhang e Cheng (2021).
Nota: Os espaçamentos entre os CPSs foram estimados para fins ilustrativos.

Segundo os autores, os valores obtidos experimentalmente mostraram boa concordância com os obtidos por simulação, e variações na espessura dos CPSs podem fornecer mais graus de liberdade para melhorar o acoplamento entre modos locais, contribuindo, assim, para o aumento da absorção. Observa-se nesse estudo que os CPSs possuem diâmetro de 10 cm, enquanto a estrutura completa apresenta diâmetro de 11,8 cm, ou seja, as inclusões metálicas possuem dimensões da mesma ordem de grandeza que a matriz que as contém.

Em contraste, Qu *et al*. (2022) apresentaram um metamaterial que emprega inclusões metálicas em escala particulada, utilizando pó de tungstênio (W) disperso diretamente na matriz polimérica. Além disso, a matriz polimérica é constituída por uma mistura de borracha com resina, ambos de poliuretano (PU), sendo os elementos ressonantes dispostos sobre uma base metálica refletora de aço inoxidável. A mistura de borracha e resina foi utilizada a fim de se sintonizar o módulo de Young desejado, enquanto a inclusão do pó de tungstênio foi utilizada, principalmente, para o incremento da densidade (Qu *et al*., 2022). Tais artifícios foram realizados a fim de se obter impedância acústica similar à da água e, simultaneamente, se reduzir a velocidade de propagação do som dentro do material. Os ressoadores foram dimensionados com comprimentos correspondentes a aproximadamente ¼ do comprimento de onda de suas respectivas frequências de projeto, sendo utilizados nove comprimentos distintos, distribuídos de modo a

CC BY

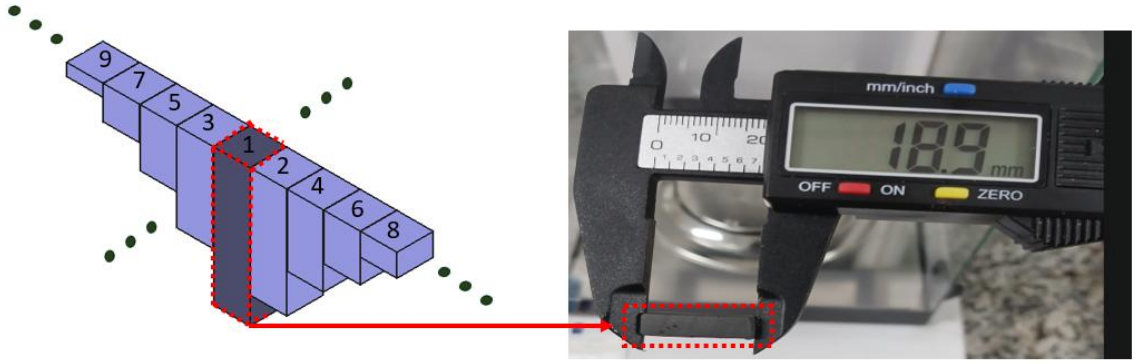
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

proporcionar absorção em banda larga. A Figura 4 apresenta a configuração dos nove elementos ressonantes, acompanhada de uma fotografia do elemento 1, que foi fabricado pelo autor deste artigo em trabalho experimental próprio, utilizando resina Task 6, borracha Simpact 85A e pó de tungstênio, com base na composição de materiais descrita no estudo de Qu *et al*. (2022). Ressalta-se que a fotografia possui finalidade meramente ilustrativa, não constituindo validação acústica experimental.

Por operarem com ¼ do comprimento de onda, a baixa velocidade do som dentro do compósito de PU/W possibilitou gerar ressoadores de pequena altura, com média de 8,9 mm. A absorção experimental média reportada pelos autores foi de 90,3% em uma faixa de 4 a 20 kHz.

Figura 4: Configuração geométrica dos nove elementos ressonantes propostos por Qu *et al*. (2022), com suas respectivas dimensões, e registro fotográfico do elemento 1, fabricado com base nos materiais descritos no estudo original.



L1 = 18.9 mm; L2 = 15.2 mm; L3 = 12.2 mm; L4 = 9.8 mm; L5 = 7.9 mm; L6 = 6.4 mm; L7 = 4.6 mm; L8 = 3.1 mm; L9 = 1.7 mm

Fonte: Elaboração própria, com base em Qu *et al*. (2022).

Dentre as principais conclusões, é destacado pelos autores que, diferentemente de absorvedores baseados em bolhas de ar, o absorvedor proposto possui potencial de redução do problema de degradação de performance sob pressão hidrostática, tendo sido analisado, por simulação, seu comportamento sob uma pressão hidrostática correspondente à profundidade de 500 m. Tal comportamento é apresentado nos gráficos obtidos pelo Método dos Elementos Finitos, constantes no material suplementar do estudo. A análise feita pelos autores representa uma possível solução para um problema associado à deformação das cavidades de ar sob elevada pressão hidrostática, o que pode fazer com que os

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

modos de absorção se desviem daqueles para os quais o material foi originalmente projetado.

Para facilitar a comparação entre os estudos analisados, a Tabela 2 apresenta um resumo comparativo dos principais parâmetros mencionados para as abordagens com inclusões metálicas em matrizes poliméricas.

Tabela 2: Síntese comparativa das abordagens com inclusões em matrizes poliméricas.

Autor(es)	Metal	Polímero	Frequência(s)	Absorção
Zhou *et al*. (2020)	Partículas à base de ferro (*hydroxyl iron*) *	PDMS	~100 kHz e faixa de MHz	Pico de 0,96 em ~100 kHz; valores próximos da unidade** na faixa de MHz
Zhang e Cheng (2021)	Aço	Borracha	800 Hz – 6 kHz	Média > 0,82; 0,94 em 1 kHz
Qu *et al*. (2022)	Tungstênio	PU (borracha + resina)	4 – 20 kHz	Média de 90,3%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Zhou *et al*. (2020), Zhang e Cheng (2021) e Qu *et al*. (2022).
Nota: * Inclusões à base de ferro em matriz polimérica, com atuação no campo magnético. ** Valores estimados a partir da Figura 6 (b) de Zhou *et al*. (2020).

Metal com função predominantemente estrutural

Em uma abordagem distinta das inclusões metálicas em matrizes poliméricas, Wang, Hu e Chen (2021) apresentaram uma estrutura na qual o metal desempenha função predominantemente estrutural. Denominada *perforated honeycomb-corrugation hybrid* (PHCH), a estrutura combina borracha e alumínio e consiste basicamente na associação de cavidades retangulares particionadas com divisórias em alumínio. Além disso, essas cavidades estão associadas a dois painéis, feitos de borracha, um no topo, apresentando microperfurações cilíndricas, enquadrando-se como *micro-perforated panel* (MPP), e um inferior sem microperfurações. Entre as divisórias também são dispostas placas corrugadas de borracha, responsáveis por compor a geometria híbrida da estrutura. A Figura 5 apresenta uma célula unitária do modelo, permitindo visualizar a distribuição das partes constituídas por borracha, das divisórias de alumínio e das placas corrugadas. A região de água e a *Perfectly*

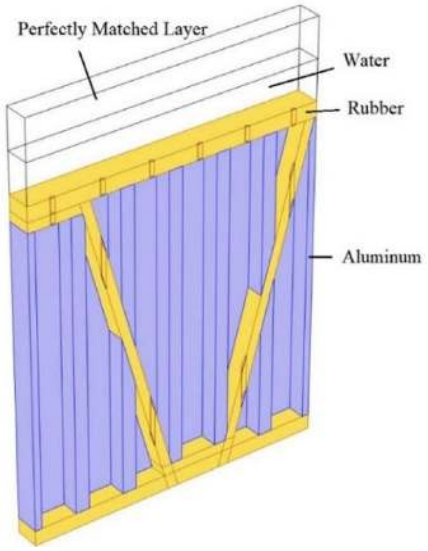
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

Matched Layer (PML) apresentadas na figura pertencem à simulação por MEF, representando, de forma simplificada, a estrutura submersa em água e um semiespaço infinito, respectivamente (Wang; Hu; Chen, 2021). É reportado pelos autores que a estrutura possui resistência à pressão, devendo-se em parte à estrutura de alumínio, capaz de reduzir deformações transversais. Para a análise de absorção, os autores definiram a faixa de frequência das simulações em valores inferiores a 1000 Hz, além de avaliarem os efeitos de incidência normal e oblíqua.

Figura 5: Célula unitária da estrutura PHCH e seus materiais constituintes.



Fonte: Wang, Hu e Chen (2021). Reproduzido sob licença CC BY 4.0.

Wang, Hu e Chen (2021) explicam que a borracha aplicada ao absorvedor apresenta dois papéis principais, sendo o primeiro a redução do descasamento de impedância acústica entre a estrutura e a água e o segundo a introdução de amortecimento, favorecendo a dissipação de energia acústica. Já as microperfurações permitem que a água do meio externo preencha as cavidades internas da estrutura. No que se refere à incidência normal, é informado que o valor de pico aparece próximo da frequência de 500 Hz, e embora o valor da absorção não seja explicitamente mencionado, uma análise do gráfico fornecido permite observar valores acima de 0,9. Em relação à incidência oblíqua, foi demonstrado que, para ângulos de incidência progressivamente maiores, a absorção aumenta em frequências inferiores a aproximadamente 200 Hz. Entretanto, para frequências

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

acima de 300 Hz, esse efeito se inverte e a absorção tende a diminuir conforme o ângulo de incidência aumenta. Cabe ressaltar que, assim como Wang *et al*. (2016), os autores não classificam explicitamente a estrutura como metamaterial. Entretanto, a proposta mantém diversas características frequentes na literatura acerca do tema. Além disso, os autores afirmam de forma direta que o trabalho traz importantes implicações para o design de metamateriais acústicos submarinos e para o controle de ondas acústicas nesse meio.

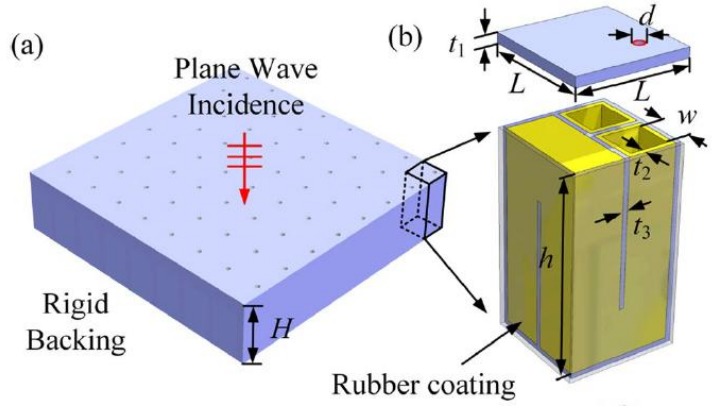
Uma outra abordagem que utiliza uma superfície perfurada, borracha e metal como estrutura foi investigada por Zhou, Duan e Xin (2022) e, posteriormente, por Zhou, Wang e Xin (2023). Em ambos os estudos, os metamateriais apresentam canais de água enrolados espacialmente (*space-coiled*), delimitados por paredes de aço e associados a uma placa perfurada na parte superior, permitindo a entrada do som. O aço desempenha função estrutural e atua como fronteira acusticamente rígida, enquanto o revestimento interno de borracha contribui para o amortecimento, o casamento de impedância acústica com a água e a redução da velocidade efetiva do som, fenômeno denominado nos estudos como *slow sound* (Zhou; Duan; Xin, 2022; Zhou; Wang; Xin, 2023). Ambas as investigações foram conduzidas por meio de análises teóricas e simulações pelo Método dos Elementos Finitos, sem validação experimental. Zhou, Duan e Xin (2022) reportaram absorção superior a 0,99 em 155 Hz, além de destacar a pequena razão entre a espessura do absorvedor e o comprimento de onda, valor de apenas 1/456 nessa mesma frequência. Já Zhou, Wang e Xin (2023), para a configuração apresentada na Figura 6, obtiveram absorção superior a 0,99 em 181 Hz.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

Figura 6: Metamaterial acústico: (a) arranjo periódico; (b) célula unitária.



Fonte: Zhou, Wang e Xin (2023). Reproduzido sob licença CC BY 4.0.

Um segundo absorvedor também foi proposto por Zhou, Wang e Xin (2023), cuja unidade fundamental é formada pela combinação de duas células unitárias de metamaterial com alturas distintas. A estrutura completa é então composta por oito dessas unidades fundamentais. Os resultados associados a essa nova abordagem apresentaram absorção em banda larga em baixas frequências e, na faixa entre 365 e 900 Hz, absorção superior a 0,9. As similaridades entre os estudos de 2022 e 2023, inclusive pela participação de dois autores em comum, sugerem uma possível continuidade dessa linha de investigação. Essa relação é reforçada pela abordagem apresentada no estudo mais recente, que amplia a análise da configuração individual ao investigar também a resposta acústica de associações de células unitárias com características distintas.

A abordagem de combinar cavidades estruturalmente constituídas por metal, associadas a um revestimento interno de borracha, também foi estudada por Zhao *et al*. (2026), sendo que, neste caso, o acesso ao interior ocorre por meio de um canal tubular, diferentemente da abordagem anterior. No estudo, os autores analisam inicialmente um metamaterial baseado em *Quasi-Helmholtz Resonance* (QHR) para, posteriormente, compará-lo com uma proposta otimizada, denominada *Improved Quasi-Helmholtz Resonance* (IQHR). As análises foram desenvolvidas analiticamente e numericamente por meio do MEF. A Figura 7 representa a célula unitária do metamaterial baseado em QHR, na qual as paredes de aço (cinza)

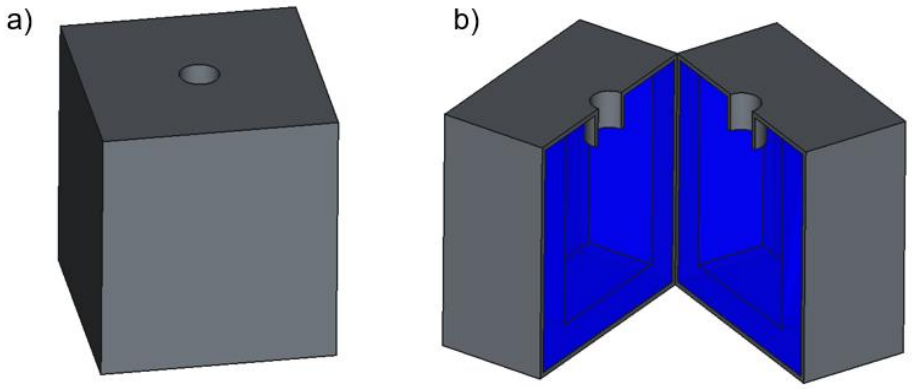
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

desempenham o papel de fronteiras rígidas, enquanto o revestimento interno de borracha (azul) está associado aos mecanismos dissipativos.

Figura 7: Representação tridimensional da célula unitária QHR: (a) geometria externa e (b) disposição dos componentes internos.



Fonte: Elaboração própria, com base em Zhao *et al*. (2026).

No que diz respeito à proposta otimizada, esta foi desenvolvida considerando o fator de perda associado ao coeficiente de Poisson complexo da borracha, efeito que, segundo os autores, foi desconsiderado em diversos estudos anteriores. Quando não nulo, esse fator reduz significativamente o pico de absorção do QHR convencional, cuja dissipação na borracha ocorre predominantemente por meio de deformações volumétricas (Zhao et al., 2026). Para mitigar esse efeito, os autores implementaram furos no revestimento interno de borracha, favorecendo a dissipação por cisalhamento que, segundo os mesmos, é menos afetada pelo fator de perda de Poisson.

De forma semelhante a Zhou, Wang e Xin (2023), Zhao *et al*. (2026) também associaram diferentes células unitárias, com parâmetros geométricos distintos, de modo que suas respostas ressonantes se sobrepusessem e produzissem um comportamento de banda larga. Nessa configuração, os autores reportaram um "platô" de absorção superior a 0,9 entre 350 e 950 Hz. Além disso, foi analisado o comportamento dessa associação sob pressão hidrostática de aproximadamente 2 MPa, observando-se um deslocamento global do "platô" de cerca de 200 Hz em direção a frequências mais elevadas. Embora o estudo não apresente validação experimental, ele traz uma discussão relevante ao evidenciar a importância de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

considerar, no projeto de absorvedores viscoelásticos, o fator de perda associado ao coeficiente de Poisson complexo que, quando desconsiderado, pode levar à superestimação da previsão de absorção.

Para facilitar a comparação entre os estudos analisados neste grupo, a Tabela 3 apresenta uma síntese dos principais materiais empregados, das faixas de frequência consideradas e dos valores de absorção reportados pelos autores.

Tabela 3: Síntese comparativa das abordagens com componentes metálicos estruturais.

Autor(es)	Metal	Polímero	Frequência(s)	Absorção
Wang, Hu e Chen (2021)	Alumínio	Borracha	100 - 1000 Hz*	Pico > 0,9 em ~500 Hz*;
Zhou, Duan e Xin (2022)	Aço	Borracha	100 – 200 Hz**	Pico ~1 em 155 Hz**
Zhou, Wang e Xin (2023)	Aço	Borracha	365 – 900 Hz (associação de células distintas)	> 0,9 (associação de células distintas)
Zhao *et al*. (2026)	Aço	Borracha	350 – 950 Hz (associação de células distintas do IQHR)	> 0,9 (associação de células distintas do IQHR)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Wang, Hu e Chen (2021), Zhou, Duan e Xin (2022), Zhou, Wang e Xin (2023) e Zhao *et al*. (2026).

Nota: * Valores estimados a partir da Figura 7 de Wang, Hu e Chen (2021). ** Valores estimados a partir da Figura 2 (a) de Zhou, Duan e Xin (2022).

4. Considerações Finais

A associação entre os estudos demonstrou que a combinação entre componentes metálicos e poliméricos em metamateriais absorvedores acústicos submarinos ocorre de forma ampla e heterogênea. Nesse contexto, os polímeros atuam principalmente no casamento de impedância acústica e na dissipação de energia por perdas viscoelásticas. Os metais, por sua vez, podem desempenhar função estrutural, atuar como fronteira rígida, aumentar a densidade do sistema ou participar diretamente dos mecanismos ressonantes. As diferentes combinações podem produzir elevados coeficientes de absorção em distintas faixas de frequência,

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

inclusive em baixas frequências. Entretanto, parte das propostas ainda se baseia predominantemente em análises teóricas e numéricas, o que evidencia a importância de validações experimentais e da avaliação do desempenho dessas estruturas sob condições reais de operação.

Dessa forma, os estudos analisados indicam que a combinação entre metais e polímeros constitui uma estratégia versátil para o desenvolvimento de metamateriais absorvedores acústicos submarinos. A diversidade das arquiteturas analisadas indica que o desempenho acústico depende não apenas dos materiais empregados, mas principalmente da função que cada componente desempenha e da forma como esses elementos são combinados na estrutura do metamaterial.

Referências

COSTA, Angelo Brandelli; ZOLTOWSKI, Ana Paula Couto. Como escrever um artigo de revisão sistemática. In: KOLLER, Sílvia Helena; COUTO, Maria Clara Pinheiro de Paula; HOHENDORFF, Jean Von (org.). **Manual de produção científica.** Porto Alegre: Penso, 2014. p. 55–70.

FISCHER, Sarah C. L.; HILLEN, Leonie; EBERL, Chris. Mechanical Metamaterials on the Way from Laboratory Scale to Industrial Applications: Challenges for Characterization and Scalability. **Materials**, v. 13, n. 16, 2020. ISSN 1996-1944. DOI: 10.3390/ma13163605. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/13/16/3605.

GOYAL, Amit Kumar. Introductory Chapter: Metamaterials – Introduction, Advantages, and Applications. In: GOYAL, Amit Kumar (ed.). **Metamaterials** - Progress, Devices and Applications. London: IntechOpen, 2025. cap. 1. DOI: 10.5772/intechopen.1010441. Disponível em: https://doi.org/10.5772/intechopen.1010441.

LIU, Zhengyou; ZHANG, Xixiang; MAO, Yiwei; ZHU, Yan Yang; YANG, Zhiyu; CHAN, Che Ting; SHENG, Ping. Locally resonant sonic materials. **Science, American Association for the Advancement of Science**, v. 289, n. 5485, p. 1734–1736, 2000.

MURUGESAN, Akila; SELVAN, Krishnasamy T.; IYER, Ashwin K.; SRIVASTAVA, Kumar Vaibhav; ALPHONES, Arokiaswami. A REVIEW OF METASURFACE-ASSISTED RCS REDUCTION TECHNIQUES. **Progress In Electromagnetics Research B**, 2021. Disponível em: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:243981425.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

QU, Sichao; GAO, Nan; TINEL, Alain; MORVAN, Bruno; ROMERO-GARCÍA, Vicente; GROBY, Jean-Philippe; SHENG, Ping. Underwater metamaterial absorber with impedance-matched composite. **Science Advances, American Association for the Advancement of Science**, v. 8, n. 20, eabm4206, 2022.

RANJBAR, Mostafa; BAYER, Muhammed Umar. Design of acoustic coating for underwater stealth in low-frequency ranges. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 46, n. 3, p. 140, 2024.

SUN, Jingbo; ZHOU, Ji. Metamaterials: The Art in Materials Science. **Engineering**, v. 44, p. 145–161, 2025. ISSN 2095-8099. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.12.011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809924007288.

VESELAGO, V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ. Phys. Usp. **Physics-Uspekhi**, v. 10, n. 4, p. 509–514, 1968. DOI: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699. Disponível em: https://ufn.ru/en/articles/1968/4/d/.

WANG, Changxian; WEN, Weibin; HUANG, Yixing; CHEN, Mingji; LEI, Hongshuai; FANG, Daining. A novel broadband waterborne acoustic absorber. **AIP Advances**, v. 6, n. 7, 2016.

WANG, Junyi; HU, Jiaming; CHEN, Yun. A composite perforated partitioned sandwich panel with corrugation for underwater low-frequency sound absorption. **Frontiers in Mechanical Engineering**, v. 7, p. 679656, 2021.

ZHANG, Yanni; CHENG, Li. Ultra-thin and broadband low-frequency underwater acoustic meta-absorber. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 210, p. 106732, 2021.

ZHAO, Tong; JING, Shikai; ZHANG, Wei; LIU, Xiaoning. Quasi-Helmholtz resonance based underwater sound absorber considering viscoelasticity with complex Poisson's ratio. **Physics Letters A**, p. 131683, 2026.

ZHOU, Xindong; DUAN, Mingyu; XIN, Fengxian. Low-frequency underwater sound absorption of hybrid metamaterials using dissipative slow-sound. **Physics Letters A**, Elsevier, v. 450, p. 128361, 2022.

ZHOU, Xindong; WANG, Xiaochen; XIN, Fengxian. Ultrathin acoustic metamaterial as super absorber for broadband low-frequency underwater sound. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 7983, 2023.

ZHOU, Yi; CHEN, Jian; LIU, Liu; FAN, Zheng; MA, Yungui. Magnetic–acoustic biphysical invisible coats for underwater objects. **NPG Asia Materials**, v. 12, n. 1, p. 27, 2020.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/11/2026 - **Accepted:** 17/11/2026
Vol: 13.24
DOI: 10.66104/wec82j90
Pages: 1-22

ZHU, Zhenjing; HU, Ning; WU, Junyi; LI, Wenxin; ZHAO, Jiabao; WANG, Maofa; ZENG, Fanzong; DAI, Huajie; ZHENG, Yongju. A review of underwater acoustic metamaterials for underwater acoustic equipment. **Frontiers in Physics**, v. 10, 2022. ISSN 2296-424X. DOI: 10.3389/fphy.2022.1068833. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2022.1068833

CC BY