

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
EM GUERRA ELETRÔNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA: Estudo Exploratório e Análise Comparativa de
Materiais para a Blindagem de Sistemas Críticos Navais.



PRIMEIRO-TENENTE KAÍQUE GOSNE E SILVA

Rio de Janeiro
2025

PRIMEIRO-TENENTE KAÍQUE GOSNE E SILVA

BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA: Estudo Exploratório e Análise Comparativa de
Materiais para a Blindagem de Sistemas Críticos Navais.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução
Almirante Alexandrino como requisito parcial à
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado
em Guerra Eletrônica

Orientadores:

Dr. Roberto da Costa Lima

1º Ten. João Paulo da Silva Queiroz Menezes

Rio de Janeiro
2025

BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA: Estudo Exploratório e Análise Comparativa de
Materiais para a Blindagem de Sistemas Críticos Navais.

Primeiro-Tenente Kaíque Gosne e Silva

MONOGRAFIA APRESENTADA AO CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE
ALEXANDRINO COMO REQUISITO PARCIAL À CONCLUSÃO DO CURSO DE
APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM GUERRA ELETRÔNICA

Aprovada por:

Dr. Roberto da Costa Lima, D.Sc. - IPqM

1º Ten. (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes, D.Sc. - IPqM

Prof. Carlos Vinicio Rodriguez, D.Sc. - PUC-RJ

Prof. Newton Adriano dos Santos Gomes, M.Sc. - ITA

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
NOVEMBRO DE 2025

Silva, Kaíque Gosne e

BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA: Estudo Exploratório e Análise Comparativa de Materiais para a Blindagem de Sistemas Críticos Navais. – Rio de Janeiro: MB/CIAA, 2025.

xiv, 60 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Dr. Roberto da Costa Lima e 1º Ten. (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes.

Trabalho de Conclusão de Curso – MB/CIAA/Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 56-60.

1. Blindagem Eletromagnética. 2. Interferência Eletromagnética. 3. Ambientes Marítimos. I. da Costa Lima, Roberto. II. Marinha do Brasil, CIAA, Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica. III. Título.

Dedico este trabalho à minha esposa, pelo apoio e paciência ao longo desta jornada acadêmica, ao meu filho, cuja presença me inspira diariamente a ser melhor e a perseverar diante dos desafios, minha família que sempre esteve me apoiando nos momentos de dificuldade e a Deus, pela minha saúde, de minha família e pela oportunidade de viver esta vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e saúde para superar cada desafio ao longo desta jornada.

À minha esposa Mariana, por seu amor incondicional, paciência e apoio em todos os momentos. Seu companheirismo foi essencial, mesmo nos dias em que o tempo foi curto e as responsabilidades exigiram esforço dobrado. Ao meu filho Caetano, que nos agraciou com sua chegada em nossas vidas nesse ano que jamais será esquecido e, com seu sorriso e pureza, me inspirou diariamente a persistir e acreditar que cada momento de dedicação valeria a pena, fiz e faço tudo por vocês.

À minha mãe Marcia, minha avó Vera e minha sogra Mônica por serem exemplos de dedicação, amor e carinho, além de, principalmente, serem uma rede de apoio fundamental para meu desempenho acadêmico neste ano de desafios, cuidando com extremo zelo e carinho do meu pequeno Caetano nos momentos em que tive que me fazer menos presente.

Expresso também minha sincera gratidão ao meu orientador, Dr. Roberto da Costa Lima e ao meu coorientador, Primeiro-Tenente (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes, pela cordialidade, orientação técnica, direcionamento, confiança depositada e pela paciência durante o desenvolvimento deste trabalho. Não poderia me furtar de agradecer ao Capitão Tenente Max e Capitão Tenente Kaíque Serpa pela ajuda na busca por maiores informações referentes às Fragatas Classe Tamandaré que, mesmo não obtendo o resultado esperado, foram solícitos e buscaram ajudar com as informações requeridas, naquilo que os competia.

Agradeço ao Capitão Tenente Ogioni, coordenador do curso de guerra eletrônica e amigo de longa data, pelo apoio institucional e por sua constante disposição em promover um ambiente de aprendizado e excelência, sempre procurando ajudar e ouvir os pleitos da turma.

E, finalmente, aos meus amigos e colegas de turma, em especial do quarto de guerra eletrônica, pela parceria, conversas, risadas e pelo privilégio de novamente desfrutar do convívio diário, que tornou esta caminhada mais leve e enriquecedora.

RESUMO

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao CIAA/MB como requisito parcial para a conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado para Oficiais da Armada

BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA: Estudo Exploratório e Análise Comparativa de Materiais para a Blindagem de Sistemas Críticos Navais.

Kaíque Gosne e Silva

Novembro/2025

Orientador(es): Dr. Roberto da Costa Lima

1º Ten. (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes

Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica

A blindagem eletromagnética pode ser entendida como uma técnica que visa primordialmente a proteção de equipamentos eletrônicos contra Interferências Eletromagnéticas (EMI). Ela tem se mostrado de extrema importância no contexto tecnológico atual, marcado pela crescente presença de dispositivos que utilizam o espectro eletromagnético e, conseqüentemente, pelo aumento do risco de interferências que podem comprometer o funcionamento de sistemas críticos. No ambiente naval, essa preocupação torna-se ainda mais relevante, devido à elevada complexidade e densidade de dispositivos embarcados que operam de forma interdependente. Desta forma, busca-se analisar materiais e técnicas de blindagem, avaliando sua eficácia e adequação ao meio marítimo. A pesquisa, classificada como exploratória e descritiva, baseia-se em revisão bibliográfica e documental sistemática, reconhecendo-se a limitação do acesso a dados técnicos sigilosos de projetos navais. Constata-se que, embora metais tradicionais ofereçam alta Eficiência de Blindagem (SE), primordialmente pela reflexão, eles apresentam desvantagens de peso elevado e suscetibilidade à corrosão em ambientes marítimos. Os resultados evidenciam que a tendência global é a adoção de materiais compósitos, como polímeros intrinsecamente condutores e nanocompósitos leves e resistentes, que atuam predominantemente por absorção, evitando poluição eletromagnética secundária. Conclui-se que a blindagem eletromagnética é uma medida de proteção eletrônica fundamental, e a migração para materiais leves, absorvedores e de elevada resistência à corrosão é essencial para garantir a confiabilidade e a eficácia operacional das embarcações em ambientes agressivos, como o naval.

Palavras-chave: Blindagem eletromagnética; Interferência eletromagnética; Ambientes marítimos.

ABSTRACT

Abstract of the Undergraduate Final Work presented to CIAA/MB as a partial fulfillment of the requirements for the conclusion of the Advanced Improvement Course for Navy Officers.

ELECTROMAGNETIC SHIELDING: Exploratory Study and Comparative Analysis of Materials for the Shielding of Critical Naval Systems

Kaíque Gosne e Silva

November/2025

Advisor(s): Dr. Roberto da Costa Lima

1º Ten. (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes

Advanced Improvement Course in Electronic Warfare

Electromagnetic shielding can be understood as a technique primarily aimed at protecting electronic equipment against electromagnetic interference (EMI). It has proven to be of great importance in the current technological context, characterized by the growing presence of devices operating within the electromagnetic spectrum and, consequently, by the increased risk of interference that may compromise the performance of critical systems. In the naval environment, this concern becomes even more significant due to the high complexity and density of interdependent onboard devices. Therefore, this study seeks to analyze shielding materials and techniques, assessing their effectiveness and suitability for maritime conditions. The research, classified as exploratory and descriptive, is based on a systematic bibliographic and documentary review, acknowledging the limitation of access to classified technical data from naval projects. It was found that although traditional metals offer high shielding effectiveness (SE), primarily through reflection, they present disadvantages such as high weight and susceptibility to corrosion in marine environments. The results indicate a global trend toward the adoption of composite materials, such as intrinsically conductive polymers and lightweight, durable nanocomposites, which operate mainly through absorption and thus avoid secondary electromagnetic pollution. It is concluded that electromagnetic shielding is a fundamental electronic protection measure, and the transition to lightweight, absorptive, and corrosion-resistant materials is essential to ensure the reliability and operational effectiveness of vessels operating in harsh environments, such as naval.

Keywords: Electromagnetic Shielding; Electromagnetic Interference; Naval Environments.

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 4.1 – Comparação de metais utilizados para blindagem eletromagnética.....	35
Quadro 4.2 – Comparação de polímeros condutores utilizados para blindagem eletromagnética.....	37
Quadro 4.3 – Comparação de nanocompósitos utilizados para blindagem eletromagnética	37
Quadro 4.4 – Comparação entre soluções tradicionais e emergentes.....	40
Tabela 4.1 – Análise de técnicas de medição de SE.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mecanismos de blindagem eletromagnética	12
Figura 2.2 – Comparação entre os termos na teoria de Schelkunoff e na teoria de Cálculo; (a) material com condutividade elétrica igual a $5,8 \times 10^7$ S/m e espessura de 10 μm ; (b) material com condutividade elétrica igual a $5,8 \times 10^7$ S/m e espessura de 1 μm ; (c) material com condutividade elétrica igual a 1×10^1 S/m e espessura de 2 mm; (d) material composto CB/PLA com espessura de 2 mm	15
Figura 2.3 – Métodos de medição de SE; (a) método da caixa blindada; (b) método da sala blindada (câmara anecóica); (c) método de linha de transmissão coaxial; (d) método de campo aberto (espaço livre)	24
Figura 2.4 – Método do guia de onda	25
Figura 2.5 – Distribuição percentual por países de publicações científicas envolvendo o tema materiais compostos.....	28
Figura 2.6 – Características de diferentes matérias-primas de blindagem EMI	29
Figura 4.1 – SE por Compósito/Mistura de materiais em frequências da banda X.....	42
Figura 4.2 – SE por Compósito/Mistura de Materiais nas Faixas de HF/VHF/UHF	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviatura	Termo em Inglês	Termo em Português
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AgNWs	-	Nanofios de Prata
AIS	Automatic Identification System	Sistema de Identificação Automática
Al/SiC	Composite of Aluminum with Silicon Carbide	Compósitos de Alumínio com Carbetto de Silício
ANATEL	-	Agência Nacional de Telecomunicações
ANVISA	-	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASTM	American Society for Testing and Materials	Sociedade Americana para Testes e Materiais
C/C	Carbon/Carbon	Carbono/Carbono
CB	Carbon Black	Negro de Fumo
CF	Carbon Fiber	Fibra de Carbono
CISPR	International Special Committee on Radio Interference	Comitê Especial Internacional sobre Interferência de Rádio
CM	Carbon Matrix	Matriz de Carbono
CNFs	Carbon Nanofibers	Nanofibras de Carbono
CNTs	Carbon Nanotubes	Nanotubos de Carbono
Co	Cobalt	Cobalto
Cu-Ni	Copper-Nickel Alloy	Liga de Cobre-Níquel
dB	-	Decibéis
EMC	Electromagnetic Compatibility	Compatibilidade Eletromagnética
EMF	Electromagnetic Fields	Campos Eletromagnéticos
EMI	Electromagnetic Interference	Interferência Eletromagnética
ESD	Electrostatic Discharge	Descarga Eletroestática
EVA	Ethylene Vinyl Acetate Copolymer	Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila
FCT	-	Fragatas Classe Tamandaré
Fe ₃ O ₄	Magnetite/Iron Oxide	Magnetita/Óxido de Ferro
GE	-	Guerra Eletrônica
GO	Graphene Oxide	Óxido de Grafeno
GPS	Global Positioning System	Sistema de Posicionamento Global
IEC	International Electrotechnical Commission	Comissão Eletrotécnica Internacional
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

MAE	-	Medidas de Ataque Eletrônico
MARE	-	Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
MIL	Military	Militar
MPE	-	Medidas de Proteção Eletrônica
MWCNT	Multi-Walled Carbon Nanotube	Nanotubos De Carbono de Paredes Múltiplas
Ni-ferrita	Nickel Ferrite	Ferrita de Níquel
Níquel (Ni)	Nickel	Níquel
P	Phosphorus	Fósforo
PAni	Polyaniline	Polianilina
PCL	Polycaprolactone	Policaprolactona
PDMS	Polydimethylsiloxane	Polidimetilsiloxano
PE	Polyethylene	Polietileno
PEI	Polyetherimide	Polieterimida
PICs	ICPs	Polímeros Intrinsecamente Condutores
PLA	Polylactic Acid	Poli(Ácido Lático)
PP	Polypropylene	Polipropileno
PPy	Polypyrrole	Polipirrol
PS	Polystyrene	Poliestireno
PTT	Polytrimethylene Terephthalate	Politereftalato de Trimetileno
PVDF	Polyvinylidene Fluoride	Fluoreto de Polivinilideno
P&D	-	Pesquisa e Desenvolvimento
rGO	Reduced Graphene Oxide	Óxido De Grafeno Reduzido
SE	Shielding Effectiveness	Eficiência de Blindagem
SE _A	-	Perda por Absorção
SE _A '	-	Perda por Absorção(Teoria do Cálculo)
SE _M	-	Perda por Múltiplas Reflexões
SE _M '	-	Perda por Múltiplas Reflexões (Teoria do Cálculo)
SE _R	-	Perda por Reflexão
SE _R '	-	Perda por Reflexão (Teoria do Cálculo)
STD	Standard	Padrão
UHMWPE	Ultra-high Molecular Weight Polyethylene	Polietileno de Ultra-Alto Peso Molecular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação do Tema	1
1.2 Breve Histórico	3
1.3 Justificativa e Relevância	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo Geral	4
1.4.2 Objetivos Específicos	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Fundamentação Teórica	6
2.1.1 Conceitos Básicos de EMI	6
2.1.2 Conceito de blindagem eletromagnética	9
2.1.3 Evolução da EMI e da blindagem eletromagnética em Meios Navais	16
2.1.3.1 Antigas Práticas e Interferências	16
2.1.3.2 O Cenário Naval e Marítimo Moderno	16
2.1.3.3 Práticas e Intervenções Modernas na Blindagem em Meios Navais	17
2.1.3.4 Aumento Exponencial das Interferências até os Tempos Modernos.....	18
2.1.4 Materiais para Blindagem Eletromagnética	18
2.1.4.1 Metais	18
2.1.4.2 Polímeros Condutores.....	19
2.1.4.3 Nanomateriais	19
2.1.4.4 Compósitos Híbridos	20
2.1.5 Aplicações Práticas em Meios Navais	21
2.1.6 Técnicas Práticas de Medição da SE.....	22
2.1.6.1 Método de Linha de Transmissão Coaxial (ASTM D4935).....	22
2.1.6.2 Método da Caixa Blindada	22
2.1.6.3 Método da Sala Blindada (Câmara Anecoica)	23
2.1.6.4 Método de Campo Aberto (Espaço Livre)	23
2.1.6.5 Método do Guia de Onda (Método da Caixa Blindada Modificado)	24
2.1.6.6 Uso de Parâmetros S em Analisadores Vetoriais de Rede	25
2.1.6.7 Relevância de Medições na Faixa de Frequências Marítimas	26

2.2 Revisão da Literatura	27
2.2.1 Pesquisas Internacionais.....	27
2.2.2 Pesquisas no Brasil.....	27
2.2.3 Comparação entre Soluções Tradicionais e Emergentes	28
2.2.3.1 Soluções Tradicionais (Metais de Alta Densidade):	29
2.2.3.2 Soluções Emergentes (Compósitos Leves e Nanomateriais)	30
2.2.4 Identificação de Tendências	31
3 METODOLOGIA.....	32
3.1 Classificação da Pesquisa	33
3.1.1 Classificação Quanto aos Fins	33
3.1.2 Classificação Quanto aos Meios	33
3.2 Limitações	34
3.3 Tratamento dos Dados	34
4 RESULTADOS	35
4.1 Apresentação dos Dados Obtidos Por Meio da Pesquisa Bibliográfica.....	35
4.1.1 Panorama Geral dos Materiais Utilizados em blindagem eletromagnética	35
4.1.1.1 Materiais Metálicos e Ferromagnéticos.....	35
4.1.1.2 Polímeros e Compósitos Poliméricos	36
4.1.1.3 Nanocompósitos	37
4.1.1.4 Resultados Comparativos: Soluções Tradicionais Versus Emergentes.....	39
4.1.2 Apresentação de Resultado de Materiais Promissores para Uso em Meios Navais	41
4.1.3 Apresentação de Dados sobre Técnicas de Medição de SE.....	43
5 DISCUSSÃO.....	43
5.1 Fatores que Afetam a SE	43
5.1.1 Influência da Condutividade, Permeabilidade Magnética, Espessura e Porosidade na SE.....	44
5.2 Análise Crítica dos Resultados Obtidos	45

5.2.1 Metais Tradicionais Versus Compósitos Modernos e Suas Relevâncias em Ambiente Naval	45
5.2.2 Análise dos Materiais Amostrados	46
5.2.2.1 Análise dos Materiais Amostrados em Frequências da Banda X.....	46
5.2.2.2 Análise dos Materiais Amostrados em Frequências de HF/VHF/UHF.....	47
5.2.3 Análise de Técnicas Utilizadas para a Medição de SE em um Ambiente Naval.....	49
5.2.4 Aplicações Práticas e Teóricas.....	50
5.2.4.1 Soluções Aplicáveis em Nível Prático Já Possuindo Maturidade Comercial.....	50
5.2.4.2 Soluções Restritas ao Nível Experimental/Emergente	50
6 CONCLUSÕES.....	51
6.1 Considerações Finais.....	51
6.2 Lacunas e Oportunidades para Estudo em Meios Navais.....	53
6.2.1 Corrosão e Salinidade	53
6.2.2 Vibração e Impacto	54
6.2.3 Integração Multifuncional para Aplicações Navais	54
6.2.4 Efeito de Juntas e Aberturas em Ambientes Navais	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Tema

O presente trabalho aborda a Interferência Eletromagnética (EMI) e a blindagem eletromagnética, com foco em sua aplicação e relevância no ambiente naval. O objeto de estudo é a análise de materiais e práticas de blindagem em resposta à crescente complexidade dos sistemas de bordo.

Segundo Katulski e Namiotko (2019) o crescente intrincamento dos sistemas embarcados, como radares, comunicações e sistemas de navegação, que tem papel fundamental no controle, manobra e defesa de embarcações modernas, reflete a tendência global de digitalização e automação no ambiente marítimo, tanto no meio civil quanto no militar, exigindo maior atenção aos impactos da compatibilidade eletromagnética. A confiabilidade destes sistemas está diretamente ligada à mitigação de EMI internas e externas.

A EMI pode ser entendida como um fenômeno em que um campo elétrico ou magnético, seja ele natural ou artificial, afeta negativamente o funcionamento de equipamentos eletrônicos. Situações cotidianas como o ruído em televisões causado por eletrodomésticos ou falhas em comunicações em aviões ilustram bem esse tipo de interferência. A EMI pode se manifestar na forma radiada, conduzida ou induzida, podendo causar desde pequenos desconfortos, como distorções em imagens, até situações críticas como falhas em sistemas médicos, alarmes falsos e queima de componentes sensíveis (Cassiolato, 2013).

Devido à elevada densidade de equipamentos embarcados e ao espaço físico limitado, a gestão da EMI em navios requer, além de blindagens físicas, um planejamento adequado da localização de sistemas e antenas para minimizar riscos operacionais (Metalock Brasil, 2021). Em aplicações navais militares, especialmente, a falha de um subsistema eletrônico por interferência pode comprometer toda a operação da embarcação, incluindo armamentos, comunicação e navegação.

Para Montenegro (2020), com o avanço tecnológico e a densificação de dispositivos eletrônicos, tornou-se comum a ocorrência de EMI em sistemas digitais e analógicos que operam em altas frequências, como redes industriais ou ambientes hospitalares, exigindo o uso de blindagens, aterramento e filtros para controle.

Klingelfus (2019) afirma que, em ambientes navais, a presença simultânea de transmissores de alta potência e receptores sensíveis, aliados ao espaço físico restrito, torna a EMI um risco crítico. Nestes casos, o fenômeno de *Co-site Interference* (CI) — interferência entre sistemas instalados fisicamente próximos — é frequentemente

observado, podendo comprometer a recepção de sinais vitais, como os do sistema de posicionamento global (GPS). A operação simultânea de radares em embarcações diferentes, mas próximas, também pode provocar interferência co-canal, especialmente quando os feixes de radar se alinham em ângulos específicos. Esse tipo de interferência pode deteriorar a detecção e o rastreamento, algo extremamente sensível em missões militares (Tavares *et al.*, 2023).

Dessa forma EMI no ambiente naval, especialmente o militar, representa um desafio crescente, pois a complexidade dos sistemas embarcados e a limitação espacial agravam a possibilidade de acoplamentos indesejáveis entre sinais. A mitigação exige estudo detalhado de posicionamento de antenas, simulações eletromagnéticas e aplicação de técnicas como filtros de micro-ondas e blindagens específicas (Klingelfus, 2019).

O domínio do espaço eletromagnético tornou-se essencial para a segurança da navegação e no comando e controle das operações navais, especialmente em regiões estratégicas como a Amazônia Azul, onde sua vulnerabilidade a interferências exige uma arquitetura robusta de proteção eletromagnética (Vieira, 2024).

Como apresentado por Silvano (2023), sem a devida proteção, há riscos significativos de falhas nos equipamentos, o que pode comprometer tanto a operação quanto a segurança das embarcações. Nesse contexto, a blindagem eletromagnética surge como uma necessidade estratégica, não apenas em aplicações militares, mas também no setor mercantil marítimo, onde a confiabilidade dos sistemas eletrônicos é essencial para a navegação segura e a eficiência logística (Silvano, 2023).

A blindagem eletromagnética consiste no uso de equipamentos, materiais condutores e/ou magnéticos no intuito de impedir ou reduzir a propagação de ondas eletromagnéticas, evitando que interfiram no funcionamento de dispositivos eletrônicos. Esse tipo de proteção atua tanto no uso de circuitos eletrônicos para neutralizar ou minimizar a EMI, quanto como uma barreira física que bloqueia ou atenua a densidade de potência incidente, preservando a integridade e o desempenho dos sistemas. O conceito está diretamente associado à eficiência de blindagem (SE), parâmetro que expressa a razão entre a densidade de potência da onda incidente e a densidade de potência residual que atravessa o material, medida em decibéis (dB). Quanto maior o valor de SE, menor é a fração de densidade de potência transmitida, indicando melhor desempenho da blindagem (Antonio, 2021; Peng; Qin, 2021; Silvano, 2023).

O mecanismo de atuação de uma blindagem baseia-se em três fenômenos principais: reflexão, absorção e múltiplas reflexões internas. A reflexão ocorre quando a onda eletromagnética interage com uma superfície cuja impedância é diferente da

referente ao meio de propagação, retornando parcialmente em direção à fonte. Esse efeito é típico de materiais com elevada condutividade elétrica, como metais, sendo a principal forma de proteção em blindagens condutivas. Já a absorção corresponde à dissipação da energia eletromagnética no interior do material, geralmente convertida em calor por meio de perdas dielétricas, magnéticas ou condutivas. Esse mecanismo é favorecido por um equilíbrio entre as propriedades de permissividade elétrica, permeabilidade magnética e espessura dos materiais de modo a permitir o casamento de impedância e a atenuação máxima das ondas incidentes. Materiais muito finos podem não dissipar energia suficiente, enquanto materiais excessivamente espessos podem gerar reflexões internas indesejadas; por isso, existe uma espessura ótima, frequentemente relacionada a uma fração do comprimento de onda da radiação no interior do material, que garante a absorção máxima. Por fim, múltiplas reflexões ocorrem quando a radiação se reflete repetidas vezes no interior do material, especialmente em estruturas com interfaces internas ou porosidade, promovendo dispersão adicional da energia. Esse efeito tende a ser mais relevante em materiais finos ou projetados para aproveitá-lo e pode ser desprezado em blindagens espessas, nas quais a onda atinge a segunda interface já com amplitude muito reduzida (Ramoá, 2015; Shukla, 2019; Zecchi *et al.*, 2024).

1.2 Breve Histórico

Em 1836 James Faraday descobriu e criou a gaiola de Faraday e seu principal objetivo era demonstrar que um campo elétrico externo (como descargas elétricas) é anulado dentro de uma estrutura condutora fechada, como uma gaiola metálica (Mishra *et al.*, 2019). A fundamentação da blindagem eletromagnética deriva da formulação das equações de Maxwell (1860–1873) e dos estudos teóricos de Hans Bethe, em 1944, sobre difração de ondas por pequenas aberturas. Segundo Celozzi, Araneo e Lovat (2008) e Dutta *et al.* (2019) esses trabalhos definiram os primeiros modelos de penetração de campos e blindagem metálica. As primeiras aplicações navais aparecem em registros de radares e rádios de guerra (década de 1930), conforme apresentado por Celozzi, Araneo e Lovat (2008) e Antonio (2021).

Como apresentado por White (1980), a norma militar, MIL STD-285, publicada em 1956, foi um marco técnico-histórico mundial para avaliação de blindagens de rádio frequências. A partir daí, blindagens passaram a ser projetadas sistematicamente em ambientes militares e navais, com uso extensivo de aço, cobre e ligas de alta permeabilidade (Mu-metal, Permalloy). Na década de 1970, o conceito de CI já aparecia em plataformas de múltiplos transmissores embarcados (Paul, 2006).

Geetha *et al.* (2009) nos apresentam que nos anos de 1980, inicia-se o emprego polímeros condutores e compósitos, como polianilina (PAni) e polipirrol (PPy), em blindagem eletromagnética, impulsionada por fatores de peso, corrosão e miniaturização eletrônica. Em 1997 o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) cria a norma STD-299 que substitui a MIL STD-285 e se torna a principal referência de medição de eficácia de blindagem (Celozzi, Araneo e Lovat, 2008). Nos anos 1990, aparecem os primeiros trabalhos sobre compósitos com negro de fumo (CB) e fibra de carbono (CF) (Geetha *et al.*, 2009).

Com o avanço da nanotecnologia, surgem os nanotubos de carbono (CNTs), nanofibras de carbono (CNFs,) grafeno, óxido de grafeno reduzido (rGO) e MXenes, ampliando a SE e priorizando a absorção em substituição à reflexão. Antonio (2021) data o início dessa revolução nos anos 2000.

A partir de 2014, intensifica-se a pesquisa em metamateriais e blindagens inteligentes, formalizando uma mudança de tecnologia da aplicação dos materiais no contexto da blindagem eletromagnética (Zecchi *et al.*, 2024).

1.3 Justificativa e Relevância

O crescimento da complexidade dos sistemas eletrônicos embarcados em meios navais aumenta a vulnerabilidade à EMI, podendo comprometer a eficácia operacional e a segurança das missões. Compreender os fundamentos, soluções técnicas e tendências de blindagem eletromagnética é essencial para o desempenho e proteção desses sistemas navais, tornando essa área de pesquisa uma necessidade estratégica.

A blindagem eletromagnética é fundamental para proteção de sistemas críticos em embarcações militares, onde a precisão e confiabilidade são cruciais para a logística, combate e navegação segura. O domínio sobre os materiais, normas e técnicas de blindagem eletromagnética eleva a resiliência, a robustez e a competitividade tecnológica das forças navais — beneficiando também a Marinha do Brasil (MB), mesmo que de forma indireta.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Este estudo busca analisar os materiais, técnicas e formas de medição existentes no campo da blindagem eletromagnética em meios navais, avaliando sua eficácia e possíveis

impactos em sistemas embarcados por meio de extensa pesquisa bibliográfica e documental, culminando na apresentação de dados.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Explicar e apresentar, de forma conceitual, o que é EMI e blindagem eletromagnética, detalhando o fenômeno em que um campo elétrico e magnético afetam negativamente o funcionamento de equipamentos eletrônicos.
- b) Discutir a relevância e o risco da EMI no ambiente naval, especialmente o militar, abordando a complexidade dos sistemas embarcados e o impacto da interferência em sistemas críticos como radares, comunicações e GPS.
- c) Detalhar os três mecanismos principais de atuação da blindagem eletromagnética: perda por reflexão (SE_R), perda por absorção (SE_A) e perda por múltiplas reflexões (SE_M).
- d) Apresentar o conceito de SE, incluindo a sua definição em termos de densidade de potência, campo elétrico ou magnético, e a controvérsia conceitual entre a teoria clássica de Schelkunoff e a Teoria de Cálculo.
- e) Traçar a evolução histórica da EMI e da blindagem eletromagnética, desde as primeiras aplicações navais na década de 1930, a criação de normas militares como a MIL-STD-285 em 1956, até a migração para polímeros condutores e nanomateriais a partir dos anos 1980 e 2000, impulsionada pela busca por leveza e resistência à corrosão.
- f) Apresentar e comparar os materiais utilizados na blindagem eletromagnética, incluindo metais tradicionais (cobre, alumínio, aço), polímeros intrinsecamente condutores (PICs) e nanomateriais emergentes (CNTs, Grafeno, MXenes), destacando as tendências de priorizar a absorção em detrimento da reflexão.
- g) Descrever as técnicas práticas laboratoriais de caracterização dos materiais para a determinação da SE, como o método de Linha de Transmissão Coaxial – pela norma D4935 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) –, o método do guia de onda, método da caixa blindada, método da câmara anecoica e método do campo aberto.
- h) Compilar dados de SE de compósitos e misturas de materiais que são considerados promissores para o uso em meios navais, fornecendo resultados

específicos, como aqueles obtidos nas faixas críticas da banda X e de HF/VHF/UHF.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi dividida em duas subseções, na tratativa de fundamentar a teoria em torno do assunto abordado, e posteriormente uma exposição mais especificada do material nacional e internacional relativo ao tema, apresentando uma comparação entre soluções tradicionais e emergentes, além de identificação de tendências.

2.1 Fundamentação Teórica

Nesta seção é apresentado, de forma conceitual, o significado de EMI e blindagem eletromagnética, além de um histórico da evolução dessas capacidades no ambiente naval bem como, são apresentados materiais empregados para esta blindagem, aplicações práticas e técnicas utilizadas para a determinação de sua SE.

2.1.1 Conceitos Básicos de EMI

Segundo Cassiolato (2013), a EMI é definida como uma perturbação, causada por um campo ou onda eletromagnética, que pode degradar, obstruir ou interromper o desempenho de equipamentos e dispositivos. Trata-se de uma energia que provoca respostas indesejáveis, podendo se manifestar como distúrbios visuais em televisores, estática em rádios ou falhas mais graves em sistemas complexos (Geetha *et al.*, 2009; Cassiolato, 2013). Ainda conforme Cassiolato (2013), a EMI pode ocorrer por meio de radiação, condução ou através de indução, podendo ainda envolver uma combinação desses modos. Essa perturbação é caracterizada por ser intencional ou acidental, de origem natural ou artificial.

A relevância da EMI no cenário naval é particularmente alta devido à complexidade e à densidade de sistemas eletrônicos a bordo. Navios, especialmente os de guerra, são plataformas complexas que integram múltiplos sistemas operando simultaneamente em um espaço físico restrito. Essa proximidade entre equipamentos emissores de alta potência e receptores sensíveis cria um ambiente propício para um tipo específico de EMI conhecido CI. (Klingelfus, 2019; Rodica *et al.* 2021). A crescente dependência de sistemas eletrônicos avançados para navegação, comunicação e operações de guerra eletrônica (GE) torna a proteção contra ameaças eletromagnéticas um pilar fundamental para assegurar a confiabilidade, funcionalidade, proteção e

desempenho das embarcações (Metalock Brasil, 2021; Silvano, 2023; Deveci; Çapar; Tezel, 2025)

Como exposto por Rodica *et al.* (2021) as embarcações navais estão equipadas com uma vasta gama de dispositivos que geram campos eletromagnéticos (EMF), tornando o ambiente naval com uma elevada quantidade de fontes de EMI. Muitas dessas fontes são intencionais, projetadas especificamente para emitir ondas eletromagnéticas provenientes tanto do próprio meio quanto de terceiros, sendo amigos ou inimigos – podendo inclusive ser uma medida de ataque eletrônico (MAE) – enquanto outras são não intencionais, como motores elétricos (Klingelfus, 2019; Montenegro, 2020; Antonio, 2021). As principais fontes incluem:

- a) **Sistemas de Comunicação:** Equipamentos de radiocomunicação, telefones portáteis, redes Wi-Fi e sistemas de comunicação via satélite, são fontes significativas de EMI. Os enlaces de comunicação em navios frequentemente exigem alta potência radiada para cobrir longas distâncias, o que intensifica o potencial de interferência (Klingelfus, 2019; Rodica *et al.*, 2021).
- b) **Radares:** Fundamentais para navegação, alerta antecipado e controle de armamento, os radares emitem pulsos de alta potência que podem interferir em outros sistemas a bordo (Rodica *et al.*, 2021; Antonio, 2021). A interferência mútua entre radares de diferentes embarcações amigas quando, por exemplo, em formatura também é uma preocupação (Tavares *et al.*, 2023).
- c) **Sistemas Eletrônicos Gerais:** A bordo, existem também dispositivos que, embora não projetados para transmitir, emitem radiação espúria na faixa de micro-ondas a partir de seus circuitos internos, como gravadores de voz (Antonio, 2021).
- d) **Equipamentos de Potência e Motores:** Fontes não intencionais de EMI são muito comuns em ambientes industriais e navais. Motores elétricos, especialmente o centelhamento em suas escovas, geradores, chaveamento de circuitos de potência, acionamentos de relés, lâmpadas fluorescentes e sistemas de ignição são fontes comuns de perturbações eletromagnéticas (Cassiolato, 2013; Montenegro, 2020; Antonio, 2021). A própria infraestrutura de produção e distribuição de eletricidade a bordo é uma fonte a ser considerada como sugere Rodica *et al.* (2021).
- e) **Descargas Eletrostáticas (ESD) e Atmosféricas:** ESD entre pessoas e equipamentos, e fenômenos naturais como descargas atmosféricas (raios),

também são fontes relevantes de EMI em um navio (Cassiolato, 2013; Rodica *et al.*, 2021).

- f) **Outras Fontes:** Lâmpadas fluorescentes, aquecedores, sistemas de identificação automática (AIS), equipamentos de GE, entre outras (Cassiolato, 2013; Rodica *et al.*, 2021).

A EMI pode perturbar seriamente a operação de equipamentos elétricos e eletrônicos, causando falhas e erros em dados de saída (Cassiolato, 2013). No ambiente naval, onde a precisão e a confiabilidade são cruciais, os impactos podem ser severos, principalmente nos seguintes sistemas:

- a) **Sistemas de Navegação:** Equipamentos como o GPS, são particularmente vulneráveis. Sinais de alta potência, mesmo que fora da banda nominal de um receptor GPS, podem saturar o estágio frontal do receptor, degradando o desempenho da recepção. Isso pode levar à redução de sua sensibilidade e à distorção dos sinais recebidos, resultando em uma perda de orientação e direção para a embarcação (Klingelfus, 2019; Silvano, 2023).
- b) **Sistemas de Comunicação:** Segundo Fernandes (2018 *apud* Silvano, 2023), a EMI pode causar a perda de comunicações críticas, comprometendo a capacidade do navio de se comunicar com outras unidades ou com centros de comando. Em receptores de amplitude modulada, por exemplo, um sinal forte indesejado pode se impor à modulação do sinal fraco desejado, um efeito conhecido como *cross-modulation* (Klingelfus, 2019).
- c) **Sistemas de GE:** Estes sistemas são projetados para operar em ambientes eletromagnéticos complexos, mas também são suscetíveis à EMI. Como previamente apresentado, a interferência pode ser intencional (ex: armas de microondas de alta potência), ou não intencional (ex: conversores), e ambas podem comprometer a eficácia e a segurança desses sistemas críticos. Em uma blindagem eletromagnética ativa, faz-se o uso de EMI intencional, que além de MAE, quando utilizadas para causar interferência em sistemas inimigos, podem também ser empregadas como MPE, onde *jammers* e dispositivos de *spoofing* podem ser afetados se a EMI estiver mascarando o sinal-alvo, levando o sistema de ataque a identificar frequências incorretas como sendo este sinal e, assim, direcionar suas ações de bloqueio para a frequência incorreta como sugerem Dutta *et al.* (2019); Brasil (2023); Liu *et al.* (2023) e Silvano (2023).

- d) **Sistemas de Comando e Controle:** A interferência pode levar sistemas a falhas inesperadas, como atuação de relés sem comando, alarmes falsos e, no pior caso, danos permanentes aos circuitos eletrônicos, comprometendo sistemas de comando e controle (Cassiolato, 2013).

2.1.2 Conceito de blindagem eletromagnética

A blindagem eletromagnética é fundamental para proteger sistemas eletrônicos contra EMI, e a blindagem pode ser tanto ativa – visando inutilizar ou reduzir as EMI através de circuitos eletrônicos – quanto passiva, que será o foco deste estudo. A blindagem eletromagnética passiva é definida como o uso de barreiras físicas para reduzir a propagação de EMF em uma área específica. Essas barreiras são geralmente confeccionadas com materiais condutores ou magnéticos. O objetivo é tanto proteger equipamentos eletrônicos sensíveis de interferências externas, que podem causar mau funcionamento ou danos, quanto evitar que a radiação gerada por este mesmo equipamento sensível interfira em outros sistemas próximos. A blindagem eletromagnética é considerada, por essência, uma medida de proteção eletrônica (MPE), haja vista que seu escopo fundamental é a proteção dos equipamentos para assegurar a utilização eficaz e segura das próprias emissões eletromagnéticas (Antonio, 2021; Brasil, 2023; Silvano, 2023; Orasugh; Ray, 2023).

Fundamentalmente, uma blindagem ideal envolveria completamente os componentes eletrônicos, sem aberturas funcionando como uma gaiola de Faraday. Na prática, qualquer abertura, como fendas ou passagens para cabos, pode reduzir significativamente sua eficácia. (Tong, 2009; Rodica *et al.*, 2021). Como bem apresentou Cassiolato (2013), podemos exemplificar esta importância imaginando uma fonte radiante, como uma antena, que emite um EMF. Esse campo pode se acoplar a um fio condutor que esteja próximo da antena, induzindo uma corrente elétrica. Essa corrente pode então fluir livremente para dentro de um compartimento, atingindo os componentes eletrônicos internos ali presentes, danificando-os ou deteriorando seu corretp funcionamento. O processo inverso também pode ocorrer: o ruído gerado internamente pode se acoplar ao fio, sair do invólucro e ser irradiado para o ambiente. Esse tipo de penetração compromete completamente a eficácia da blindagem. Por isso, passagens de cabos como essas precisam ser tratadas com cuidado para garantir a proteção adequada. Entre as soluções mais comuns estão o uso de filtros nos pontos de entrada dos cabos ou a utilização de cabos blindados com a blindagem conectada à estrutura de proteção de forma periférica.

Em meios navais, por exemplo, a blindagem é uma estratégia imperativa para mitigar os riscos associados à exposição a EMF adversos, garantindo a operacionalidade dos sofisticados sistemas de comunicação e armamento (Rodica *et al.*, 2021).

A SE é o parâmetro quantitativo mais utilizado para avaliar o desempenho de uma blindagem, sendo expressa em dB (atenuação em dB ou -dB). . As fórmulas mais comuns, presentes em diversos estudos como em Celozzi, Araneo e Lovat (2008), Geetha *et al.* (2009), Tong (2009) e Peng e Qin (2021) são:

Para o campo elétrico, como representado pela Equação 1:

$$SE = 20 \log \frac{|E_i|}{|E_t|} \quad (1)$$

Para o campo magnético, como representado pela Equação 2:

$$SE = 20 \log \frac{|H_i|}{|H_t|}. \quad (2)$$

Em termos de potência, como representado pela Equação 3:

$$SE = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_t} \right). \quad (3)$$

Onde os subscritos ‘i’ e ‘t’ referem-se às ondas incidentes e transmitidas, respectivamente. Os termos ‘E’, ‘H’ e ‘P’ representam o campo elétrico, campo magnético e potência, respectivamente. Segundo Martins (2012) uma SE de 20 dB, por exemplo, corresponde a uma atenuação de 99% da radiação.

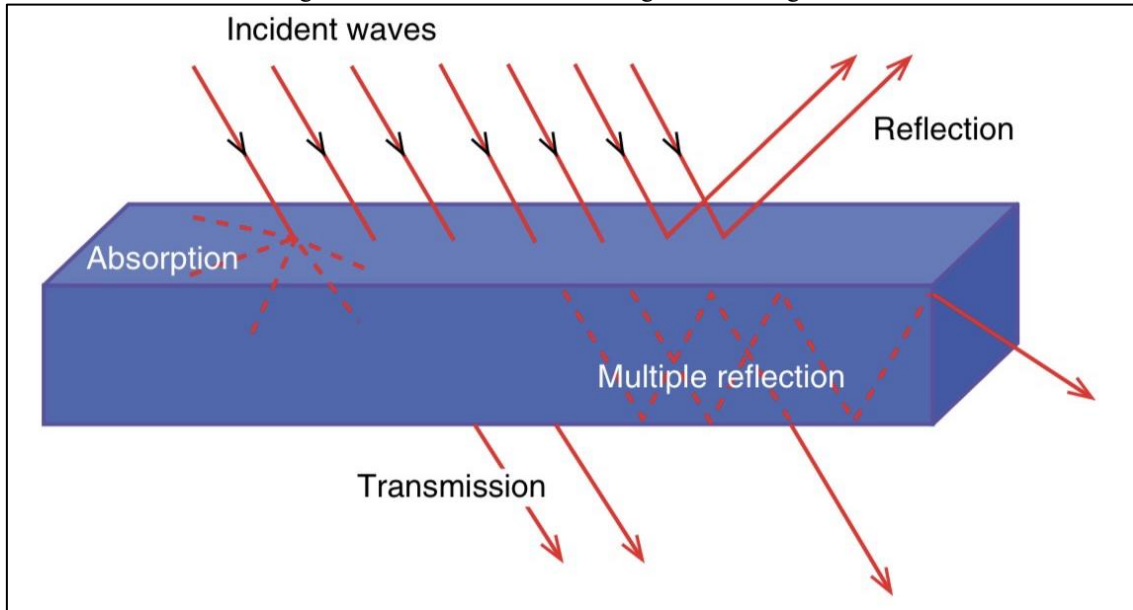
A atenuação total da radiação por uma blindagem é o resultado de três mecanismos principais: reflexão, absorção e por múltiplas reflexões internas, como ilustrado na Figura 2.1 (Liu *et al.*, 2023).

- a) **Reflexão:** Este é frequentemente o mecanismo primário e ocorre na superfície do material de blindagem devido à discordância de impedância entre o meio (ar) e a superfície. Materiais com alta condutividade elétrica, como metais (cobre, alumínio), são eficazes na reflexão porque possuem elétrons livres na superfície que interagem com a radiação incidente. A espessura do material tem pouco efeito neste mecanismo, pois a reflexão ocorre na superfície material (Ramoia, 2015; Aswathi *et al.*, 2019).

- b) **Absorção:** Considerado um mecanismo secundário, a absorção ocorre quando a onda eletromagnética, após penetrar no material, é dissipada na forma de calor. Para que isso ocorra, a onda eletromagnética incidente interage com o material, realizando a polarização em função dos dipolos elétricos e/ou magnéticos, característicos de materiais com perdas dielétricas (alta constante dielétrica) ou magnéticas (alta permeabilidade). Diferente da reflexão, a SE_A depende da combinação adequada de espessura, permissividade elétrica e permeabilidade magnética do material, de modo a garantir o casamento de impedância com o espaço livre e a atenuação máxima das ondas incidentes (Ramoá, 2015; Aswathi *et al.*, 2019; Deveci; Çapar; Tezel, 2025).
- c) **Múltiplas Reflexões Internas:** Este mecanismo ocorre quando as ondas, refletidas internamente nas interfaces do material, sofrem novas reflexões dentro da blindagem. É um fator relevante em estruturas porosas ou multicamadas (laminadas), onde há uma elevada área de superfície ou interfacial. (Ramoá, 2015; Aswathi *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2023). Como apresenta Ramoa (2015), quando uma onda incide sobre a superfície do material, parte dela é refletida, parte é absorvida e, ao chegar à segunda superfície do material, a onda pode ser parcialmente transmitida e parcialmente refletida de volta para o interior do material, ocasionando, a partir de cada interação com uma superfície interna, uma nova reflexão. Estas tendem a reduzir a SE. Entretanto, quando elas acarretam sucessivas etapas de absorção, a eficiência é aumentada.

Ramoá (2015) ainda apresenta que para a estimativa de uma espessura de blindagem eficiente, utiliza-se a definição de *Skin depth*, que é a profundidade (distância), a partir da superfície do condutor, na qual a onda eletromagnética é atenuada para, aproximadamente, 37% da sua potência original. Se a espessura da blindagem for maior que a *Skin depth*, a onda refletida é absorvida pelo material. Já quando a espessura for menor, as múltiplas reflexões podem reduzir a SE total da blindagem. Entretanto, mesmo materiais finos, caso contenham estruturas projetadas para isso, como espumas, podem aumentar a atenuação ao prolongar o caminho da onda dentro do material, favorecendo a absorção.

Figura 2.1: Mecanismos de blindagem eletromagnética



Fonte: Aswathi *et al.* (2019).

A *Skin depth* (δ) é calculada em metros (m), como apresentado pela Equação 4.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

E μ , definido pela Equação 5, é:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (5)$$

Onde ' f ', ' μ ', ' μ_r ' e ' σ ' representam, respectivamente, frequência (Hz), permeabilidade magnética (H/m), permeabilidade magnética relativa do material e condutividade elétrica do material (S/m). A componente ' μ_0 ' é a permeabilidade no vácuo com valor igual a $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m).

Analisando a equação 4, podemos observar que o valor de δ é inversamente proporcional a f , μ e σ , demonstrando que, quanto maior a SE – devido à interação do material condutor com a radiação eletromagnética – menor será a *Skin depth*, propiciando a implementação de uma blindagem mais fina.

Segundo Peng e Qin (2021), há um conflito conceitual significativo na literatura sobre a SE. A teoria clássica de *Schelkunoff* define a SE total como a soma de três termos: SE_R , SE_A e SE_M . Nesta teoria, cada termo tem um significado físico distinto e pode ser derivado de parâmetros fundamentais do material e da onda (Liu *et al.*, 2023).

Na prática, porém, utiliza-se uma abordagem diferente, aqui chamada de "Teoria de Cálculo", que decompõe a SE em apenas dois termos, também denominados perda por reflexão (SE_R') e perda por absorção (SE_A'), calculados diretamente a partir dos parâmetros de espalhamento (parâmetros S) medidos experimentalmente. Segundo Peng e Qin (2021) muitos estudos consideram erroneamente que os termos da "Teoria de Cálculo" são aproximações dos termos da teoria de *Schelkunoff* quando as SE_M são desprezíveis. Contudo, Peng e Qin (2021) esclarecem que se tratam de grandezas físicas diferentes, como é observado nas equações a seguir.

Na abordagem teórica, SE_R , SE_A e SE_M , são definidos pelas Equações 6, 7 e 8:

$$SE_R = 20 \log \left| \frac{1}{T_{21}T_{12}} \right| \quad (6)$$

Onde T_{21} e T_{12} são os coeficientes de transmissão da superfície dianteira e traseira, respectivamente.

$$SE_A = 20 \log |e^{\gamma t}| \quad (7)$$

Onde γ e t são a constante de propagação e a espessura da blindagem, respectivamente.

$$SE_M = 20 \log |1 - (\Gamma_1)^2 e^{-2\gamma t}| \quad (8)$$

Onde Γ_1 é o coeficiente de reflexão da superfície dianteira.

Assim, pela teoria de *Schelkunoff*, a SE pode ser definida conforme apresentado pela Equação 9.

$$SE \text{ (dB)} = SE_R + SE_A + SE_M \quad (9)$$

Na abordagem prática temos, SE_R' e SE_A' , definidos pelas Equações 10 e 11.

$$SE_R' = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_{AV}} \right) \quad (10)$$

$$SE_A' = 10 \log \left(\frac{P_{AV}}{P_T} \right) \quad (11)$$

$$P_{AV} = P_i - P_r \quad (12)$$

Onde P_i , P_r , P_{AV} e P_T são, respectivamente, a potência da onda incidente, a potência da onda refletida, a potência da onda disponível (que representa a potência da onda que entra no material, definida pela Equação 12) e a potência da onda transmitida.

Assim, pela teoria de cálculo, a SE é definida conforme apresentado pela Equação 13.

$$SE \text{ (dB)} = SE_R' + SE_A' \quad (13)$$

Como pontuado no estudo feito por Peng e Qin (2021) as equações de SE_R e SE_R' são diferentes, da mesma forma que SE_A e SE_A' também são, demonstrando, através da comparação das equações, que estamos tratando de grandezas que possuem significados físicos absolutamente diferentes.

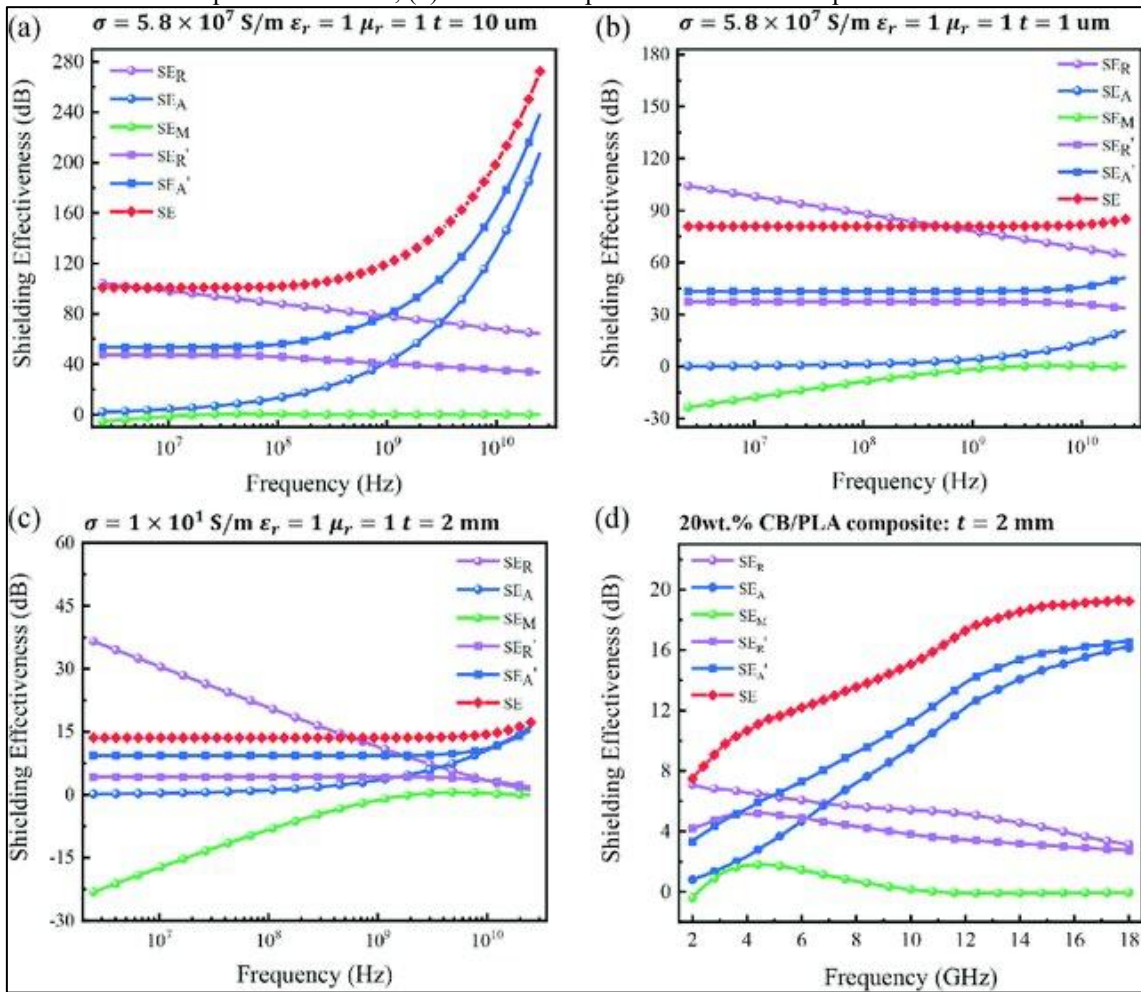
Para comprovar ainda mais esta afirmação, no mesmo estudo foram comparados os termos de cada teoria e apresentados em um gráfico, como observado na Figura 2.2. Para um material espesso eletricamente, com alta condutividade (de 2,5 kHz a 25 GHz) como mostra a Figura 2.2(a), os valores das grandezas correspondentes, ou seja, SE_R e SE_A em cada uma das teorias, aparentemente não são equivalentes. Isto, aliado ao fato de que SE_M se aproxima de zero, indicando que pode-se desconsiderá-la, demonstra que o gráfico contradiz a opinião comum de que a SE_R' e a SE_A' na teoria do cálculo são aproximações para a SE_R e SE_A na teoria de *Schelkunoff*, quando a SE_M é desprezível.

Para um material de alta condutividade com pequena espessura, como mostra a Figura 2.2(b), SE_M apresenta um valor negativo relativamente grande em frequências mais baixas, contribuindo negativamente para a eficácia total da blindagem. A SE de um material com baixa condutividade é mostrada na Figura 2.2(c), o valor de SE_R é maior que SE_R' , enquanto SE_A é menor que SE_A' na maioria das frequências. No entanto, tanto SE_R quanto SE_A são aproximadamente iguais a SE_R' e SE_A' em frequências mais altas, acima de ~10 GHz. A Figura 2.2(d) apresenta um caso prático de um material composto de CB/poli(ácido láctico) (CB/PLA) na faixa de 2 GHz a 18 GHz. Os valores de SE_R e SE_A são pequenos e próximos de SE_R' e SE_A' , respectivamente.

O fato de os termos com os mesmos nomes apresentarem valores semelhantes para alguns materiais em determinadas frequências induz à ideia equivocada de que se tratam das mesmas grandezas físicas, e que o desvio em seus valores resulta apenas da pequena divergência entre o cálculo teórico e a medição experimental. Se as dimensões das

microestruturas e das discontinuidades dos materiais forem muito menores do que o comprimento de onda da onda incidente (por exemplo, micro/nano compósitos em GHz), os materiais de blindagem podem ser considerados como meios homogêneos. Tanto a teoria de Schelkunoff quanto a teoria de Cálculo podem ser aplicadas para analisar o desempenho de blindagem desses materiais. No entanto, é mais direto calcular os termos a partir dos parâmetros S medidos na teoria de Cálculo do que na teoria de *Schelkunoff* (Peng; Qin, 2021).

Figura 2.2: Comparação entre os termos na teoria de Schelkunoff e na teoria de Cálculo; (a) material com condutividade elétrica igual a $5,8 \times 10^7$ S/m e espessura de 10 μm ; (b) material com condutividade elétrica igual a $5,8 \times 10^7$ S/m e espessura de 1 μm ; (c) material com condutividade elétrica igual a 1×10^1 S/m e espessura de 2 mm; (d) material compósito CB/PLA com espessura de 2 mm.



Fonte: Peng e Qin (2021).

O modelo da teoria de *Schelkunoff* apresentado por Peng e Qin (2021) é adequado para materiais de camada única. No entanto, o modelo simplificado da teoria de Cálculo tem os mesmos significados físicos tanto para materiais de camada única quanto para multicamadas, sendo aplicado a ambos. Além disso, a SE_R e a SE_A estão intimamente relacionadas à potência refletida e absorvida na teoria de Cálculo. Por isso, a teoria de

Cálculo é frequentemente adotada para calcular o SE e analisar o mecanismo de blindagem na prática.

2.1.3 Evolução da EMI e da blindagem eletromagnética em Meios Navais

A blindagem eletromagnética e a EMI atravessaram uma linha temporal que se inicia com os primeiros estudos sobre o eletromagnetismo e se intensifica drasticamente nos tempos modernos, impulsionada pela proliferação e miniaturização de equipamentos eletrônicos, um cenário particularmente crítico nos meios navais.

A evolução pode ser traçada desde as práticas iniciais de proteção até as soluções avançadas e leves exigidas pela eletrônica naval contemporânea.

2.1.3.1 Antigas Práticas e Interferências

Os problemas e soluções relacionados à EMI surgiram por volta do final de 1800, com o experimento do *spark-gap* de Guglielmo Marconi em 1901. Embora os primeiros receptores de rádio fossem muito suscetíveis à interferência, o estudo e a ênfase na compatibilidade eletromagnética (EMC) só ganharam força significativa mais tarde (Paul, 2006).

As perturbações eletromagnéticas mais comuns no início eram causadas por fontes como rádios, lâmpadas fluorescentes, ignição de motores, relés, motores elétricos e descargas atmosféricas (raios) (Cassiolato, 2013; Antonio, 2021). Desta forma, intervenções e materiais tradicionais começaram a ser usados em componentes e instalações críticas, com o foco em blindagem metálica, de baixa frequência e para uso militar (Souza Júnior, 2004; Sales *et al.*, 2009; Antonio, 2021).

2.1.3.2 O Cenário Naval e Marítimo Moderno

Nos meios navais a complexidade da eletrônica e as limitações físicas agravam os problemas de EMI. A proliferação de sistemas eletrônicos sofisticados após a Segunda Guerra Mundial transformou rapidamente os princípios teóricos e aplicações rudimentares em uma necessidade militar urgente, inaugurando uma era de padronização rigorosa e desenvolvimento focado em garantir a superioridade eletromagnética no campo de batalha naval, definindo uma rápida escalada na densidade de equipamentos eletrônicos a bordo de plataformas navais. Entre os anos 1930 e 1950, com o surgimento dos primeiros radares navais e sistemas de comunicação por rádio de alta potência, as CI começaram a afetar a detecção e a comunicação, que é um risco crítico até os dias atuais para a recepção de sinais vitais, como os de GPS (Paul, 2006; Klingelfus, 2019). Foi

também neste período que começaram a ser desenvolvidos mais estudos e normas regulamentadoras.

Durante as décadas de 1960 e 1970, o avanço da eletrônica embarcada e a crescente integração de sistemas — radares, comunicações e controle de armas — aumentaram a densidade de emissores e receptores a bordo (Tong, 2009; Montenegro, 2020).

Nos anos 1980 e 1990, período de transição da utilização de materiais convencionais para compósitos e padrões modernos, a miniaturização da eletrônica e o surgimento de sistemas digitais embarcados transformaram o cenário. Navios passaram a concentrar centenas de circuitos de microprocessadores e transmissores em espaços reduzidos, ampliando o espectro de frequências em uso — de HF e VHF até as faixas de micro-ondas (Klingelfus, 2019; Antonio, 2021).

A partir dos anos 2000, ocorreu uma transformação radical na ciência dos materiais de blindagem, impulsionada pela nanotecnologia. A capacidade de projetar e manipular materiais em escala nanométrica permitiu o desenvolvimento de blindagens simultaneamente mais leves, mais fortes, mais finas e multifuncionais. Esta revolução foi essencial para enfrentar os desafios eletromagnéticos causados pela disseminação de sensores inteligentes, radares multifuncionais, sistemas de comunicação via satélite e redes digitais de dados, que tornavam o ambiente eletromagnético naval extremamente congestionado (Montenegro, 2020; Antonio, 2021; Tavares *et al.*, 2023).

Hoje, no século XXI, o desafio não é apenas proteger um equipamento isolado, mas garantir que centenas de sistemas avançados e críticos possam operar simultaneamente, sem interferência mútua. O ambiente eletromagnético naval moderno é caracterizado por alta densidade espectral, equipamentos multifrequenciais, comunicações 5G, sistemas navegação satelital, radares e GE ativa — um cenário que exige materiais leves, adaptativos e sintonizáveis, capazes de absorver seletivamente diferentes faixas de frequência (Metalock Brasil, 2021).

2.1.3.3 Práticas e Intervenções Modernas na Blindagem em Meios Navais

A necessidade de materiais mais leves, flexíveis e resistentes corrosão (especialmente no ambiente marítimo agressivo) para blindagem, combinada com a busca por maior eficácia, impulsionou o desenvolvimento de novas práticas, como a adoção de compósitos poliméricos/nanomateriais, blindagens flexíveis, revestimentos condutores e a mitigação por filtros e através do projeto, onde o *design* e localização dos equipamentos é de suma importância (Klingelfus, 2019; Antonio, 2021).

2.1.3.4 Aumento Exponencial das Interferências até os Tempos Modernos

A partir do final do século XX e início do XXI, a quantidade de EMI aumentou drasticamente devido a uma conjunção de fatores tecnológicos, como:

- a) O rápido crescimento no uso de equipamentos eletrônicos (celulares, *tablets*, computadores portáteis) veio acompanhado da diminuição das dimensões desses dispositivos. Essa miniaturização permite que fontes e receptores de EMI sejam colocados mais próximos, encurtando o caminho de propagação e aumentando a oportunidade de interferência (Tong, 2009; Antonio, 2021).
- b) As novas tecnologias têm exigido sistemas cada vez mais rápidos e eficientes, operando em frequências cada vez mais elevadas (faixa de GHz). A perturbação mais comum tem ocorrido na banda X das micro-ondas (8,2-12,4 GHz), que é crucial para radares e comunicações em meios navais (Ramoá, 2015; Gobbi, 2018; Montenegro, 2020).
- c) Mais de 65% dos fabricantes relataram um aumento na demanda por soluções de proteção devido à proliferação de dispositivos inteligentes e sistemas de comunicação sem fio (Global Growth Insights, 2025).
- d) A emissão de radiações eletromagnéticas (poluição eletromagnética) tornou-se uma preocupação global, potencialmente prejudicial à saúde humana e causadora de interferência em outros equipamentos e sensores (Gobbi, 2018; Aniołczyk, 2019).

2.1.4 Materiais para Blindagem Eletromagnética

A blindagem eletromagnética pode ser produzida com o uso de diversos tipos de materiais, onde os mais utilizados serão apresentados a seguir.

2.1.4.1 Metais

Os metais e suas ligas são tradicionalmente empregados em blindagem eletromagnética devido à sua excelente condutividade elétrica, que permite refletir a EMI. Metais como cobre, alumínio, aço, níquel (Ni) e latão são comumente utilizados para este fim. Sua alta condutividade possibilita que atuem principalmente pelo mecanismo de reflexão, devido à presença de elétrons livres que interagem com as ondas eletromagnéticas. (Zhang, 2019; Shukla, 2019).

Apesar de sua eficácia, os metais apresentam limitações importantes, especialmente em aplicações navais e aeroespaciais. Uma das principais desvantagens é

o peso elevado, que é um fator limitador em projetos de blindagem, podendo aumentar o custo e o peso dos projetos. Outra limitação significativa é a suscetibilidade à corrosão, um problema acentuado em ambientes marítimos devido à exposição à névoa salina e umidade, o que pode degradar a eficácia da blindagem ao longo do tempo (Orasugh; Ray, 2023; Deveci; Çapar; Tezel, 2025). O alumínio, por exemplo, embora mais leve, é suscetível à oxidação superficial, o que pode reduzir a condutividade e, conseqüentemente, a SE. O uso de diferentes metais em contato, como em juntas com gaxetas, pode causar corrosão galvânica, comprometendo a integridade da blindagem. (Geetha *et al.*, 2009; Madhu, 2019; Modus Engineering Team, 2025).

2.1.4.2 Polímeros Condutores

PICs, como PPy, PANi e poliacetileno, surgem como alternativas promissoras aos aditivos convencionais (metais, ferritas) por combinarem condutividade com leveza, processabilidade e resistência à corrosão. Sua principal vantagem é a capacidade de atuar como centros de absorção de radiação, convertendo energia eletromagnética em calor (Ramoá, 2015; Yao *et al.*, 2021).

Como apresentam Martins (2012) e Koo *et al.* (2019), o PPy e a PANi, em particular, são amplamente estudados devido à sua facilidade de síntese e estabilidade ambiental. Polímeros condutores são frequentemente utilizados como aditivos em matrizes poliméricas, formando compósitos leves para aplicações em blindagem (Ramoá, 2015; Antonio, 2021). Segundo Faez *et al.* (2000), por exemplo, blendas de PANi com termoplásticos e compósitos à base de PPy já demonstraram eficácia de blindagem de 40 dB e 26 dB, respectivamente. Já a PANi, especificamente, é capaz de sintetizar uma formulação de absorvedores eficientes, pois sua condutividade e constante dielétrica podem ser ajustadas pelo nível, tipo de dopante e método de síntese. Esses materiais são usados em compósitos para blindagem em aplicações aeroespaciais, de defesa e eletrônicas, onde leveza é crucial. (Ramoá, 2015; Deveci; Çapar; Tezel, 2025).

2.1.4.3 Nanomateriais

Nanomateriais como CNTs, grafeno e CNFs são cada vez mais utilizados como cargas condutoras em compósitos poliméricos para blindagem eletromagnética. A vantagem desses materiais reside em sua alta razão de aspecto, excelente condutividade elétrica e grande área superficial, que permitem a formação de redes condutoras eficientes com baixas concentrações de carga (baixo limiar de percolação), preservando as

propriedades mecânicas e a leveza da matriz polimérica (Ramo, 2015; Teli; Valia, 2019; Montenegro, 2020; Antonio, 2021).

- a) **CNTs:** Apresentam propriedades elétricas, mecânicas e térmicas de alto desempenho. Sua incorporação em matrizes poliméricas, como resina epóxi ou poliuretano, melhora significativamente a condutividade e a SE (Gobbi, 2018; Antonio, 2021). Segundo Deveci, Çapar e Tezel (2025), compósitos de CNTs podem atingir alta eficácia de blindagem, sendo promissores para aplicações aeroespaciais.
- b) **Grafeno:** Sendo filme fino bidimensional de carbono, o grafeno possui condutividade elétrica e térmica extremamente elevadas. É um material promissor para blindagem leve e eficiente, frequentemente empregado em compósitos e espumas. (Ramo, 2015, Teli; Valia, 2019; Liu *et al.*, 2023).
- c) **CNFs:** Assim como os CNTs, são usadas para criar redes condutoras em polímeros, oferecendo blindagem eletromagnética com baixo peso (Martins, 2012; Montenegro, 2020; Antonio, 2021). Antonio (2021) ainda apresenta em seu estudo que compósitos com CNFs metalizadas com níquel-ferro (Ni-Fe) também mostraram bons resultados.
- d) **Nanofios de Prata (AgNWs):** Tendo alta condutividade elétrica e excelente capacidade de formação de redes condutoras, os nanofios de prata são amplamente utilizados em filmes transparentes e flexíveis para blindagem eletromagnética. Sua elevada razão comprimento/diâmetro favorece a percolação elétrica em baixas concentrações, sendo ideais para aplicações em eletrônicos flexíveis e dispositivos ópticos (Geetha *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2019).
- e) **MXenes:** São materiais bidimensionais derivados de carbetos e nitretos de metais de transição, com excelente condutividade elétrica e alta capacidade de absorção eletromagnética. Sua estrutura lamelar, funcionalização superficial e compatibilidade com matrizes poliméricas os tornam ideais para blindagem eletromagnética leve, flexível e altamente eficiente (Liu *et al.*, 2023).

2.1.4.4 Compósitos Híbridos

Para atender a múltiplos requisitos, como leveza, resistência e eficácia de blindagem, são desenvolvidos compósitos híbridos. Estes materiais combinam diferentes

classes de materiais, como polímeros, metais e cerâmicas, para obter propriedades sinérgicas (Antonio, 2021; Zecchi *et al.*, 2024).

Uma abordagem comum é a incorporação de cargas condutoras (metálicas ou carbonosas) e magnéticas (ferritas) em uma matriz polimérica. As ferritas (óxidos cerâmicos) são adicionadas para introduzir perdas magnéticas, que complementam as perdas dielétricas dos polímeros condutores ou do carbono, resultando em um material que absorve a radiação de forma mais eficiente. Essa combinação permite ajustar a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do compósito para otimizar a absorção de ondas eletromagnéticas (Ramoá, 2015; Arif *et al.*, 2019; Antonio, 2021).

Outra estratégia é a criação de estruturas multicamadas ou "sanduíche", onde camadas de diferentes materiais (por exemplo, polímero-metal-cerâmica) são combinadas para otimizar tanto a reflexão quanto a absorção das ondas. Essas estruturas são projetadas para atender aos requisitos de leveza e resistência estrutural necessários em aplicações navais e aeroespaciais (Souza Júnior, 2004; Martins 2012; Shukla, 2019).

2.1.5 Aplicações Práticas em Meios Navais

Como apresentado por Katulski e Namiotko (2019), diversas formas de blindagem já foram testadas e são aplicadas em ambientes navais para proteger equipamentos eletrônicos sensíveis, como sistemas de comunicação, radares e navegação, dais quais destacam-se:

- a) **Tintas e Revestimentos Condutores:** São uma solução prática para aplicar uma camada de blindagem em superfícies existentes, como gabinetes e paredes de compartimentos. Tintas à base de resinas (epóxi, poliuretano) carregadas com partículas condutoras (prata, Ni, cobre, grafite) formam uma barreira que reflete ou absorve a radiação. A incorporação de CNTs em tintas poliuretânicas, por exemplo, demonstrou potencial para blindagem eletromagnética (Celozzi, Araneo e Lovat, 2008) Geetha *et al.*, 2009; Gobbi, 2018; Antonio, 2021).
- b) **Revestimentos Poliméricos e Mantas Absorvedoras:** Compósitos poliméricos em forma de placas ou mantas flexíveis são usados para recobrir equipamentos ou áreas críticas. Mantas de fibras de carbono, por exemplo, são eficientes na proteção de circuitos eletrônicos contra interferências (Ramoá, 2015; Shukla, 2019; Antonio, 2021). Conforme Rodica *et al.* (2021) apresenta em seu trabalho, cortinas de proteção feitas com tecidos que possuem uma estrutura metálica (cobre, Ni, prata) também são utilizadas para

blindar janelas e isolar pessoal ou equipamentos, funcionando como uma gaiola de Faraday. Mantas protetoras podem consistir em camadas de tecido com proteção contra radiação, como as que usam fibra de bambu e prata.

2.1.6 Técnicas Práticas de Medição da SE

Como apresentado previamente nesse estudo, segundo Peng e Qin (2021), existem duas formas de cálculo da eficiência de uma blindagem, uma teórica e outra prática, onde esta última é frequentemente adotada para calcular a SE e analisar o mecanismo de blindagem na prática.

A medição da eficiência é um passo crucial para quantificar a capacidade de um material ou estrutura em atenuar ondas eletromagnéticas. Dentre as formas práticas para a estimação da SE, existem diversos métodos laboratoriais para realizar essa medição, sendo a escolha dependente de fatores como a faixa de frequência, o tipo de material e a aplicação final (Geetha *et al.*, 2009; Daniel; Thomas, 2019; Liu *et al.*, 2023).

2.1.6.1 Método de Linha de Transmissão Coaxial (ASTM D4935)

Segundo Daniel e Thomas (2019), este é um dos métodos preferenciais e padronizados para medir a SE de materiais planos.

A técnica utiliza um suporte de amostra que é uma linha de transmissão coaxial alargada, projetada para manter uma impedância característica de 50 Ω , onde amostras pequenas em formato de anel são inseridas neste suporte, como apresenta a Figura 2.3(c). O método permite não apenas determinar a SE total, mas também decompor os dados nos componentes de reflexão, absorção e transmissão. A SE é calculada pela diferença de atenuação entre uma amostra de referência e a amostra de teste, considerando as perdas de inserção e retorno. As medições são realizadas ponto a ponto ou de forma varrida com um analisador de redes vetorial. Uma das principais vantagens desta técnica é a alta reprodutibilidade e comparabilidade dos resultados entre diferentes laboratórios, superando as dificuldades encontradas no método da caixa blindada. Cabos coaxiais padrão podem fornecer uma faixa dinâmica de aproximadamente 80 dB. A ASTM reconhece este como o método padrão para medição da SE em amostras planas, utilizando a técnica ASTM D4935-99 (Geetha *et al.*, 2009; Daniel; Thomas, 2019).

2.1.6.2 Método da Caixa Blindada

O teste consiste em uma caixa metálica com uma junção eletricamente vedada, que possui uma abertura (porta de amostra) em uma das paredes, na qual é instalada uma

antena receptora, conforme apresenta a Figura 2.3(a). Uma antena transmissora é posicionada fora da caixa, e a intensidade dos sinais recebidos pela antena é registrada tanto com a abertura exposta quanto com a amostra de teste colocada sobre ela.

A limitação desse método é a dificuldade em obter um contato elétrico adequado entre a amostra e a caixa blindada. Outra preocupação é o alcance limitado de frequência, de cerca de 500 MHz. Além disso, os resultados obtidos em diferentes laboratórios apresentam baixa correlação (Daniel; Thomas, 2019).

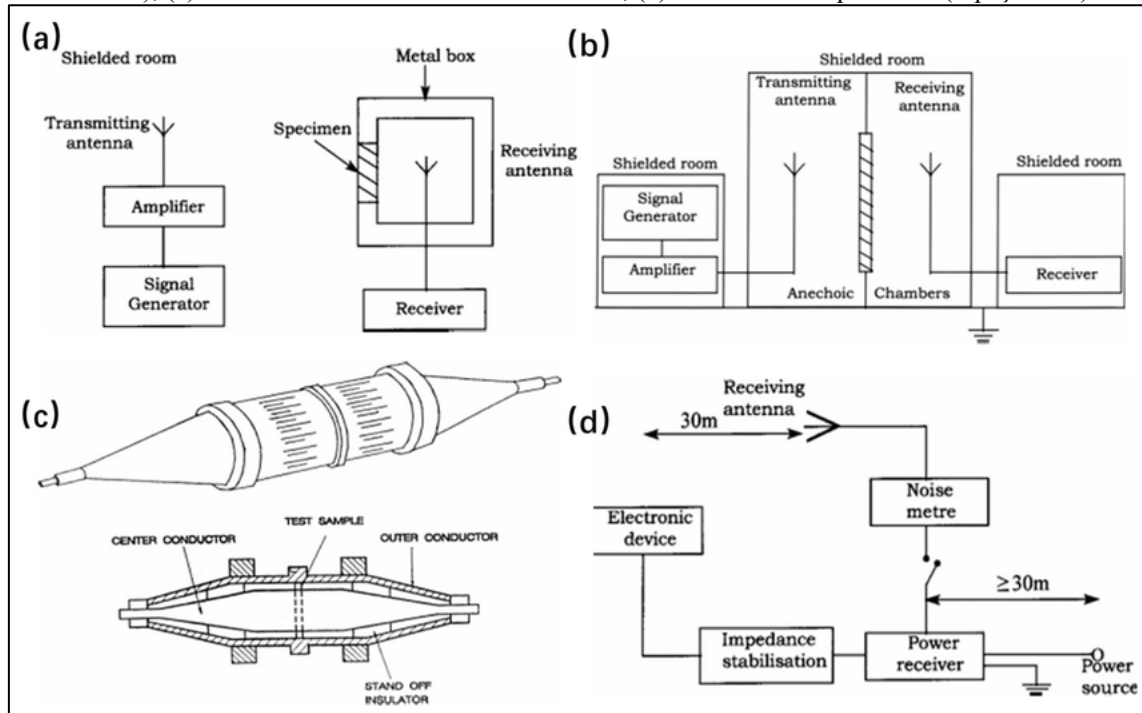
2.1.6.3 Método da Sala Blindada (Câmara Anecoica)

A câmara anecoica é um ambiente blindado, revestido internamente com material absorvedor de ondas (como pirâmides de carbono) para simular condições de espaço livre, impedindo reflexões internas e contaminação por ondas externas (Daniel; Thomas, 2019; Montenegro, 2020). Para medições de SE, o princípio geral é semelhante ao do método da caixa blindada, exceto pelo fato de que o método da sala blindada isola o gerador de sinal, a antena transmissora, a antena receptora e o gravador em salas separadas para eliminar interferências, conforme apresenta a Figura 2.3(b). A amostra, geralmente de área da amostra consideravelmente maior (tipicamente 2,5 m²), é colocada em uma abertura na parede comum entre duas câmaras. A comparação desse método com o da caixa blindada mostra que a faixa de frequência na qual são obtidos resultados consistentes pode ser significativamente ampliada, e a reprodutibilidade dos dados é notavelmente aprimorada (Geetha *et al.*, 2009; Daniel; Thomas, 2019).

2.1.6.4 Método de Campo Aberto (Espaço Livre)

O método de campo aberto (ou espaço livre) avalia a SE de um produto final já montado, medindo as emissões que escapam dele a uma distância específica, como 30 metros, de uma antena receptora, conforme apresentado pela Figura 2.3(d). O teste fornece as condições normais de uso para um dispositivo eletrônico o mais próximo possível. No mesmo teste, as emissões conduzidas transmitidas pela linha de energia também são registradas. Os resultados são documentados por um medidor de nível de ruído, que determina o nível de EMI produzido (Daniel; Thomas, 2019). Tanto o método da câmara anecoica quanto o de campo aberto são cruciais para testes de conformidade com normas de EMC (Sales *et al.*, 2009; Geetha *et al.*, 2009).

Figura 2.3: Métodos de medição de SE; (a) método da caixa blindada; (b) método da sala blindada (câmara anecóica); (c) método de linha de transmissão coaxial; (d) método de campo aberto (espaço livre).

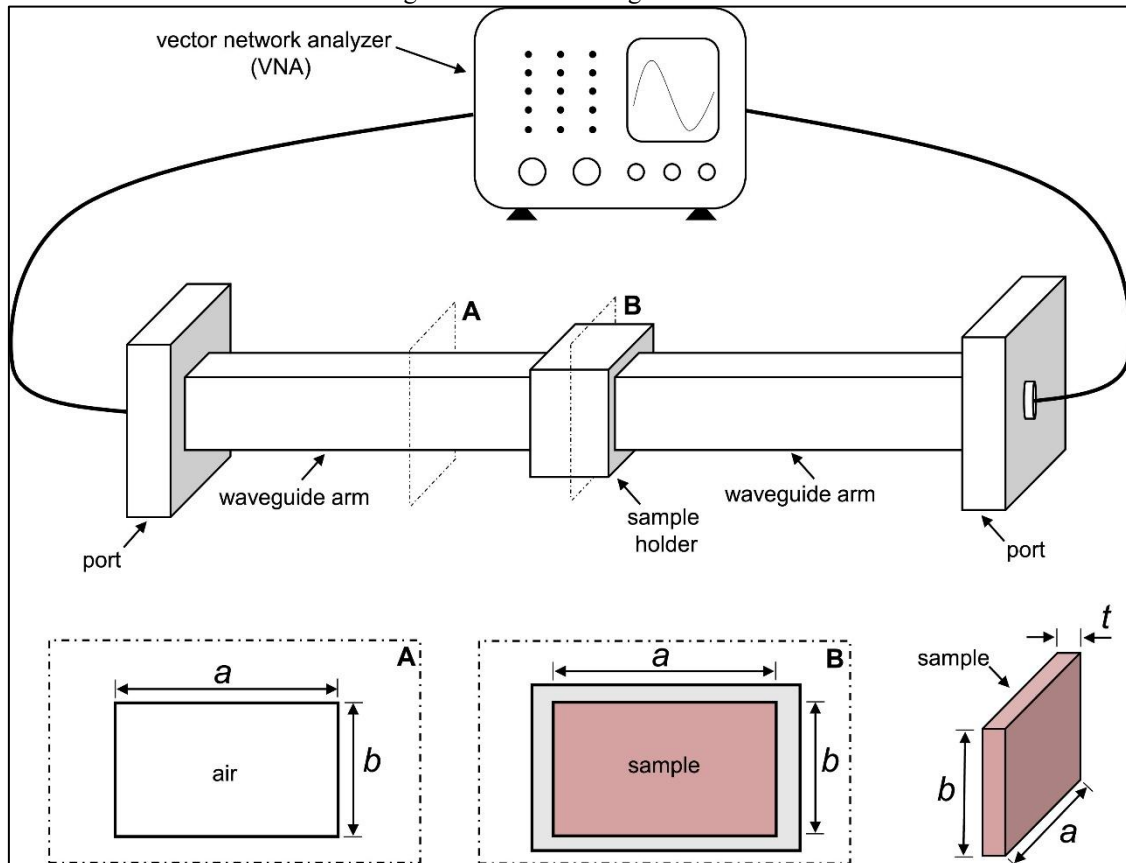


Fonte: Adaptado de Daniel e Thomas (2019).

2.1.6.5 Método do Guia de Onda (Método da Caixa Blindada Modificado)

Esta técnica utiliza um guia de ondas retangular, um dispositivo metálico oco que guia as ondas eletromagnéticas em um sistema fechado. A amostra do material é posicionada dentro do guia de ondas, e um analisador de rede compara o sinal aplicado com o sinal que atravessa a amostra, como apresenta a Figura 2.4. O tamanho do guia de onda e da amostra dependem da faixa de frequência a ser analisada; por exemplo, para a banda X (8,2 a 12,4 GHz), o guia de ondas tem uma seção transversal de 22,86 mm x 10,16 mm. O método permite a determinação de diversas propriedades eletromagnéticas, como as energias refletida, transmitida e absorvida, a SE, e as constantes dielétricas e magnéticas. Este método é capaz de superar as dificuldades encontradas no método da caixa blindada (Ramoá, 2015; Baltušnikaitė-Guzaitienė; Varnaitė-Žuravliova, 2019).

Figura 2.4: Método do guia de onda



Fonte: Loock, Anderson e Cardinaels (2024).

2.1.6.6 Uso de Parâmetros S em Analisadores Vetoriais de Rede

Em muitas técnicas de medição, especialmente as que utilizam linha coaxial e guia de onda, um Analisador Vetorial de Redes (VNA) é o instrumento central. O VNA mede os parâmetros de espalhamento complexos (parâmetros S) da amostra, que descrevem como a onda incidente é refletida e transmitida (Montenegro, 2020; Peng; Qin, 2021). Como demonstra Zecchi *et al.* (2024), os principais parâmetros S medidos em uma configuração de duas portas são S_{11} (coeficiente de reflexão da porta 1), S_{22} (coeficiente de reflexão da porta 2), S_{21} (coeficiente de transmissão da porta 1 para a porta 2) e S_{12} (coeficiente de transmissão da porta 2 para a porta 1). Esses parâmetros permitem caracterizar completamente o comportamento de reflexão e transmissão de ondas eletromagnéticas em materiais ou dispositivos inseridos na linha de medição.

Por exemplo, S_{11} indica a porção da onda que é refletida pela amostra na porta 1, enquanto o S_{12} indica a porção que atravessa da porta 2 para a porta 1. A partir desses parâmetros, é possível calcular a refletividade (R), a transmissividade (T) e a absortividade (A) do material, fornecendo uma avaliação quantitativa de sua eficiência como blindagem ou absorvedor magnético. Para um material isotrópico e recíproco (onde

$S_{11}= S_{22}$ e $S_{12}= S_{21}$), tem-se R, T e A representados pelas Equações 14, 15 e 16, respectivamente (Zecchi *et al.*, 2024).

$$R = |S_{11}|^2 \quad (14)$$

$$T = |S_{12}|^2 \quad (15)$$

$$A = 1 - R - T \quad (16)$$

Tendo como referência esses coeficientes, a SE e suas componentes de reflexão (SE_R) e absorção (SE_A) podem ser calculadas, permitindo uma análise detalhada do mecanismo de blindagem predominante no material, conforme apresentado pelas Equações 17 e 18 (Zecchi *et al.*, 2024).

$$SE_R = 10 \log(1 - |S_{11}|^2) \quad (17)$$

$$SE_A = 10 \log\left(1 - \frac{|S_{11}|^2}{|S_{21}|^2}\right) \quad (18)$$

2.1.6.7 Relevância de Medições na Faixa de Frequências Marítimas

Pelo estudo de Klingelfus (2019), pode-se concluir que a medição da SE é de grande importância para o setor naval, dada a alta concentração de sistemas eletrônicos em um espaço confinado. (Sales *et al.*, 2009; Montenegro, 2020).

Em navios, equipamentos como radares de navegação, sistemas de comunicação por satélite e GPS operam em faixas de frequência próximas, o que pode gerar EMI entre seus equipamentos (Antonio, 2021; Deveci; Çapar; Tezel, 2025). A necessidade de proteger estes equipamentos críticos, contra interferências tanto externas quanto internas, torna as medições de SE em faixas como kHz, MHz e GHz fundamentais para garantir a segurança e a eficácia operacional das embarcações (Klingelfus, 2019; Rodica *et al.*, 2021; Tavares *et al.*, 2023).

Estudos específicos avaliam a SE de materiais compósitos e tintas na banda X para determinar sua viabilidade como materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) em aplicações navais e aeroespaciais. Por exemplo, compósitos de silicone com CNTs ou compósitos de fibra de vidro com resina epóxi são testados nesta faixa para otimizar a absorção de ondas eletromagnéticas (Ramoá, 2015; Antonio, 2021; Deveci; Çapar; Tezel, 2025).

2.2 Revisão da Literatura

2.2.1 Pesquisas Internacionais

Os trabalhos internacionais, conforme evidenciado pelas referências, são vastos e bem estabelecidos, com destaque para a produção científica na Ásia (especialmente China e Índia) e nos Estados Unidos, como apresentado pela Figura 2.5. Estes estudos abordam tanto os fundamentos teóricos do eletromagnetismo por trás da blindagem quanto a caracterização de materiais tradicionais, como metais e ligas ferromagnéticas (Mumetal, Permalloy), e materiais emergentes, como polímeros condutores, nanomateriais e compósitos (Shukla, 2019; Deveci, Çapar; Tezel, 2025). Conforme apresentado por Dutta *et al.* (2019), Mishra *et al.* (2019) e Deveci, Çapar e Tezel (2025), há uma forte ênfase no desenvolvimento e teste de materiais para aplicações nos setores de defesa, aeroespacial, telecomunicações e eletrônicos de consumo.

Normas internacionais como as do IEEE (STD-299), da ASTM (D4935), do Comitê Especial Internacional sobre Interferência de Rádio (CISPR) e da *International Electrotechnical Commission* (IEC) são frequentemente citadas como referência para os métodos de medição da eficácia da blindagem, indicando um esforço global para padronizar os procedimentos de teste (Celozzi; Araneo; Lovat, 2008; Sales, 2009; Zecchi *et al.*, 2024).

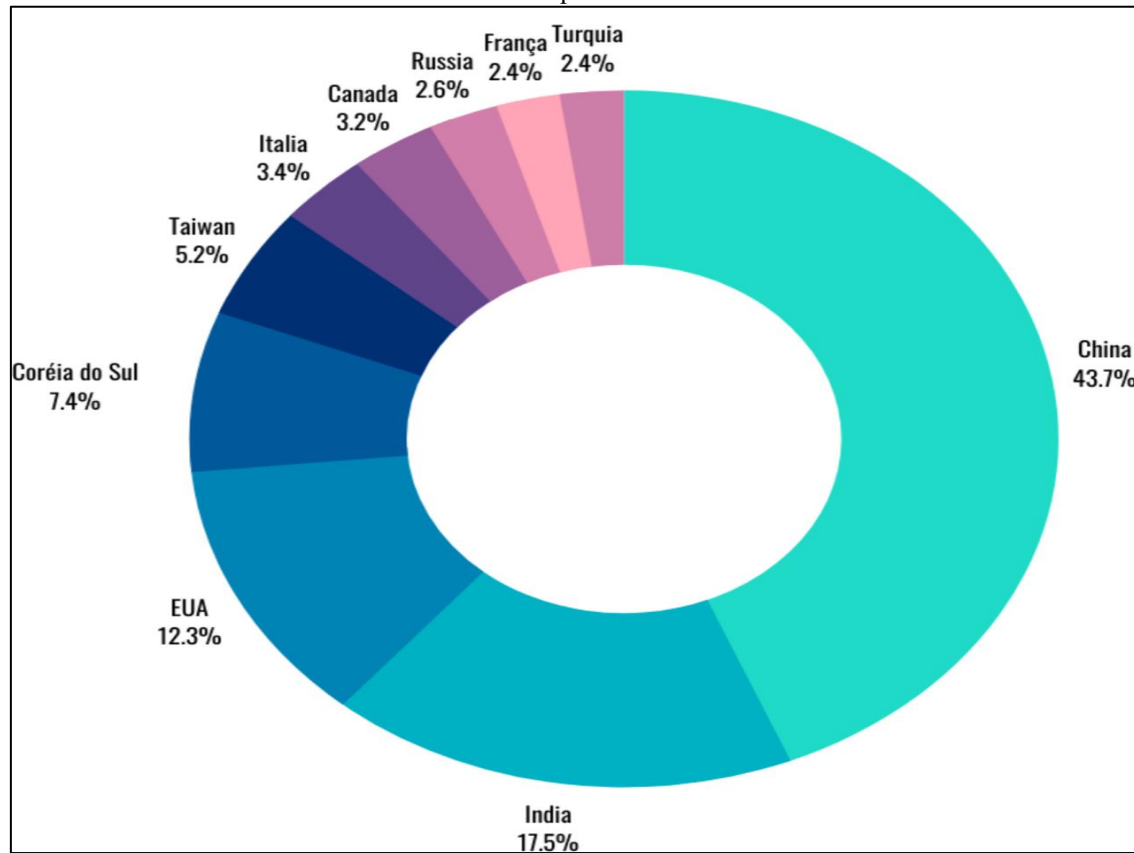
2.2.2 Pesquisas no Brasil

A produção científica brasileira, embora menos expressiva em volume comparada aos trabalhos internacionais, conforme apresentado pela Figura 2.5, demonstra atividade na área. As pesquisas nacionais focam no estudo e desenvolvimento de materiais compósitos poliméricos para blindagem, utilizando aditivos como CB e PICs (Martins, 2012; Ramoa, 2015; Antonio, 2021). Há estudos, como o de Souza Júnior (2004), dedicados à blindagem de campos magnéticos de baixas frequências (industriais, 60 Hz), utilizando materiais como aços elétricos e alumínio. A aplicação de técnicas de simulação, como, por exemplo, o Método dos Elementos Finitos, é uma das inúmeras abordagens utilizadas para analisar o desempenho de diferentes configurações de blindagem, principalmente em geometrias mais complexas, como apresentado por Matias (2001), Souza Júnior (2004) e Klingelfus (2019).

Quando se trata de estabelecer de critérios para aprovação de equipamentos quanto à EMC, as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), frequentemente baseadas em padrões internacionais da IEC e CISPR, são referenciadas, assim como a atuação de órgãos reguladores como a Agência Nacional de

Telecomunicações (ANATEL) e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (Montenegro, 2020).

Figura 2.5: Distribuição percentual por países de publicações científicas envolvendo o tema materiais compósitos

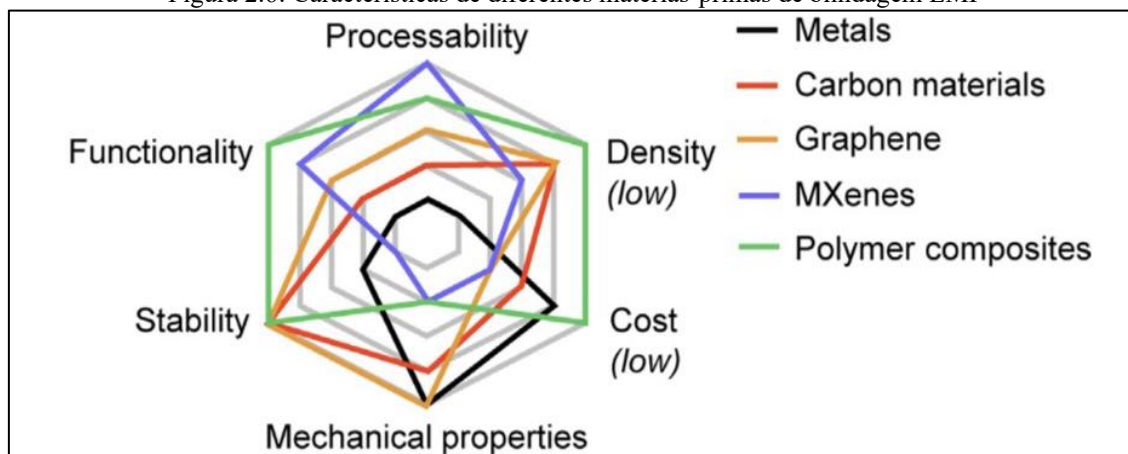


Fonte: Antonio (2021).

2.2.3 Comparação entre Soluções Tradicionais e Emergentes

A literatura utilizada como referência evidencia uma clara comparação entre as abordagens tradicionais e as soluções emergentes para blindagem eletromagnética, onde ambas são apresentadas a seguir. A Figura 2.6 apresenta uma comparação de características pontuais de cada um dos materiais, ressaltando suas qualidades e defeitos.

Figura 2.6: Características de diferentes matérias-primas de blindagem EMI



Fonte: Liu et al. (2023).

2.2.3.1 Soluções Tradicionais (Metais de Alta Densidade):

Tradicionalmente, a blindagem eletromagnética utilizava-se de metais e ligas metálicas, e pesquisas recentes, como a do Global Growth Insights (2025), mostram que continuam dominando o mercado de materiais para blindagem eletromagnética, representando cerca de 55% da participação global, em razão de sua elevada eficiência e durabilidade. Entre eles, cobre, alumínio e aço inoxidável permanecem como as principais escolhas de mais de 60% dos fabricantes, especialmente em aplicações de alta frequência e missão crítica. As blindagens metálicas são indispensáveis em ambientes onde a EMI pode comprometer a segurança operacional ou o desempenho de sistemas eletrônicos, respondendo por mais da metade das aplicações nos setores de defesa e automação industrial. Pelo fato de sua alta condutividade, estes materiais operam primariamente pelo mecanismo de reflexão das ondas eletromagnéticas devido à abundância de elétrons livres. Materiais ferromagnéticos são usados para blindar campos magnéticos de baixa frequência por meio do desvio do fluxo magnético (baixa relutância) (White, 1980; Celozzi; Araneo; Lovat, 2008; Geetha *et al.*, 2009).

Conforme apresentado por Souza Júnior (2004) e Modus Engineering Team (2025), dentre as qualidades destes tipos de matérias, há a altíssima SE, muitas vezes superando 100 dB, além de serem robustos e bem estabelecidos na indústria.

Em relação as limitações, se destaca sua alta densidade (peso elevado), a suscetibilidade à corrosão (especialmente em ambientes marítimos), a dificuldade de processamento em formas complexas e o alto custo. Além do supracitado, a reflexão excessiva pode acabar gerando poluição eletromagnética secundária (Ramoá, 2015; Antonio, 2021).

2.2.3.2 Soluções Emergentes (Compósitos Leves e Nanomateriais)

Pesquisas e desenvolvimento mais recentes focam em compósitos de matriz polimérica (termoplásticos, borrachas, resinas) com enchimentos condutores. Como os seguintes, apresentados nos trabalhos de Martins (2012), Antonio (2021), Liu *et al.* (2023) e Deveci; Çapar e Tezel (2025):

- a) **Nanomateriais de Carbono:** CNTs, CB e CNFs;
- b) **PICs:** PANi e PPy;
- c) **Partículas Magnéticas:** Ferritas e nanopartículas de ferro para compósitos híbridos; e
- d) **Materiais 2D:** Como os MXenes e Grafeno.

Conforme apresentado em Global Growth Insights (2025), estes materiais já correspondem a aproximadamente 45% do mercado global. Cerca de um terço dos fabricantes (32%) já utilizam polímeros avançados, como plásticos condutores e compósitos à base de carbono, para acompanhar as demandas crescentes da indústria, onde a adoção destes materiais tem crescido de forma consistente — quase 30% de aumento nos últimos anos — à medida que o setor busca alternativas mais leves e flexíveis aos metais tradicionais. Essas soluções poliméricas têm sido cada vez mais adotadas em aplicações que exigem redução de peso de até 20%, especialmente em eletrônicos de consumo e sistemas automotivos, onde eficiência e miniaturização são fatores determinantes.

A principal tendência é projetar materiais com blindagem dominada pela absorção, evitando a poluição eletromagnética secundária. Isso é alcançado por meio de perdas dielétricas e/ou magnéticas, onde a energia da onda é convertida em calor. Estruturas porosas ou multicamadas são usadas para promover múltiplas reflexões internas, aumentando a atenuação (Ramoá, 2015; Antonio, 2021; Liu *et al.*, 2023).

Suas principais vantagens são a leveza, a resistência à corrosão, a flexibilidade, fácil processamento em geometrias complexas e sua facilidade de integração em dispositivos eletrônicos compactos. A SE pode ser ajustada variando-se o tipo e a concentração do aditivo (Antonio, 2021; Deveci; Çapar; Tezel, 2025).

Em relação aos desafios, como sugerem Yao *et al.* (2021), há uma dificuldade em atingir a mesma eficácia de blindagem dos metais, especialmente em espessuras finas. A dispersão homogênea dos *nanofillers* na matriz polimérica é um desafio técnico crucial que afeta diretamente o desempenho. Além disso, o custo de alguns nanomateriais, como CNTs e grafeno de alta qualidade, ainda pode ser elevado (Zecchi *et al.*, 2024).

2.2.4 Identificação de Tendências

O mercado de materiais para blindagem contra EMI apresenta crescimento acelerado, impulsionado pela expansão do uso de dispositivos eletrônicos e pela exigência das normas de EMC. Atualmente, cerca de 60% dos fabricantes priorizam o desenvolvimento de materiais avançados de blindagem, buscando reduzir interferências e aumentar a confiabilidade de seus produtos (Global Growth Insights, 2025). Baseado nas informações apresentadas acima e nas fontes consultadas, as seguintes tendências são claramente identificadas:

- a) **Substituição de Metais por Compósitos Leves:** Em diversos estudos, como os apresentados por Antonio (2021), Yao *et al.* (2021) e Deveci, Çapar e Tezel (2025), é observado que há um movimento claro para substituir materiais metálicos pesados por compósitos poliméricos leves em aplicações onde o peso é um fator crítico, como nos setores aeroespacial, de defesa e de eletrônicos portáteis.
- b) **Uso de Nanomateriais:** A nanotecnologia é uma força motriz na inovação de materiais de blindagem. CNTs, que podem inclusive ser utilizados na produção de tinta poliuretânica, e grafeno são os nanomateriais mais pesquisados devido à sua altíssima condutividade elétrica e uma elevada razão de aspecto, desenvolvendo a formação de redes condutoras com baixo limiar de percolação (Gobbi, 2018; Deveci; Çapar; Tezel, 2025). Como apresentado por Liu *et al.* (2023), recentemente os MXenes surgiram como uma alternativa promissora devido à sua condutividade metálica e boa dispersibilidade em água.
- c) **Foco em Absorção e Baixa Reflexão ("Blindagem Verde"):** Para evitar a poluição eletromagnética secundária causada pela reflexão das ondas, a tendência é projetar materiais que operem predominantemente por absorção. Isso é alcançado por meio da combinação de perdas dielétricas (com materiais carbonosos ou PICs) e magnéticas (com ferritas ou nanopartículas de ferro), buscando um bom casamento de impedância com o ar para minimizar a reflexão na superfície (Ramoá, 2015; Shukla, 2019). Estruturas com múltiplas camadas, gradientes de impedância ou arquiteturas porosas (espumas) são projetadas para maximizar a absorção interna, efeito que pode ser observado em câmaras anecóicas (Montenegro, 2020; Orasugh; Ray, 2023).
- d) **Manufatura Aditiva e Customização:** Tecnologias de manufatura aditiva (impressão 3D) estão sendo exploradas para criar blindagens com geometrias

complexas e customizadas, permitindo a integração de funcionalidades e a otimização de estruturas para desempenho máximo com peso mínimo (Liu *et al.*, 2023).

- e) **Materiais Sustentáveis:** Como apresentado por Deveci, Çapar e Tezel (2015), há um interesse crescente em materiais sustentáveis e de baixo custo, como o biochar (derivado de biomassa), como uma alternativa ecológica aos nanomateriais de carbono sintéticos.

Os dados apresentados por Global Growth Insights (2025) demonstram que o segmento automotivo responde por aproximadamente 25% da demanda global, impulsionado pela eletrificação de veículos e pela integração de sistemas eletrônicos complexos. A eletrônica de consumo permanece como o principal mercado de aplicação, concentrando cerca de 40% da demanda mundial por materiais de blindagem EMI. Além disso, 45% dos fabricantes já investem em nanotecnologia para melhorar a eficiência de blindagem e reduzir o peso dos materiais. Regionalmente, a Ásia-Pacífico lidera a produção global, respondendo por mais de 50% do volume total, apoiada por robustos polos de manufatura eletrônica. A sustentabilidade também ganha destaque: cerca de 20% das empresas estão investigando materiais recicláveis e ecologicamente corretos, alinhando-se às metas ambientais globais e às novas diretrizes de design verde.

3 METODOLOGIA

Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico sistemático em bases de dados científicas, priorizando publicações de 2000 até os dias atuais, que abordassem materiais e técnicas de blindagem eletromagnética e foi realizada uma análise dos resultados de interesse para meios do ambiente naval. Apesar de existirem referências com mais de 15 anos de publicação, essas são consideradas primordiais e pilares para a fundamentação teórica e entendimento concreto sobre o assunto, técnicas e materiais estudados. Os critérios de seleção dos trabalhos incluíram:

- a) Relevância técnica, priorizando estudos com dados experimentais de SE em bandas de interesse naval (HF, VHF, UHF e banda X);
- b) Atualidade, com ênfase em revisões e pesquisas publicadas nos últimos 10 anos;
- c) Aplicabilidade ao contexto naval, considerando resistência à corrosão, umidade, salinidade e durabilidade de materiais.

As informações obtidas foram organizadas em categorias temáticas, buscando apresentar detalhadamente os seguintes elementos:

- a) Materiais Metálicos Tradicionais (cobre, alumínio, aço e ligas especiais);
- b) Polímeros Condutores e Compósitos (PAni, PPy, MXenes, CNTs, grafeno, CB, nanofibras etc.);
- c) Técnicas de Aplicação e Processamento (revestimentos, pinturas, laminados, filmes e espumas);
- d) Normas e Técnicas de ensaio de SE;
- e) Soluções Emergentes e Tendências (metamateriais e blindagens inteligentes).

Essas categorias permitiram uma análise comparativa entre materiais e soluções, considerando eficiência, densidade, custo, processabilidade e adequação ao uso naval.

3.1 Classificação da Pesquisa

3.1.1 Classificação Quanto aos Fins

O presente estudo se estrutura metodologicamente como uma pesquisa exploratória e descritiva quanto aos fins. É exploratória por buscar se obter um entendimento aprofundado e abrangente sobre as técnicas, materiais e normas aplicáveis à blindagem eletromagnética, especialmente no contexto naval. Essa abordagem se justifica visto que a produção científica nacional, embora existente, é menos expressiva em volume quando comparada à literatura internacional, como apresentado por Antonio (2021). É descritiva por se dedicar à apresentação sistemática do levantamento de dados e informações. Isso inclui a descrição detalhada dos conceitos fundamentais de EMI e blindagem eletromagnética, os três mecanismos de atenuação (reflexão, absorção e múltiplas reflexões internas), e as propriedades de diferentes classes de materiais de blindagem, desde os metais tradicionais até as soluções emergentes (como Polímeros Condutores Intrínsecos e Nanomateriais). A natureza descritiva também se reflete na compilação e apresentação de valores de SE em quadros comparativos.

3.1.2 Classificação Quanto aos Meios

Quanto aos meios, trata-se de uma pesquisa bibliográfica e documental, que enfatiza a análise comparativa. A pesquisa baseou-se na consulta de fontes primárias e secundárias, incluindo artigos científicos recentes, dissertações, teses e relatórios técnicos. Este levantamento detalhado permitiu estabelecer um panorama consolidado sobre materiais e técnicas aplicáveis à mitigação de EMI em meios navais, um ambiente caracterizado por alta densidade espectral e risco crítico de interferência.

3.2 Limitações

O objetivo inicial do trabalho era desenvolver uma análise técnica dos métodos de blindagem eletromagnética aplicados ao projeto das Fragatas Classe Tamandaré (FCT), propondo materiais ou soluções alternativas que pudessem superar ou confirmar as escolhas realizadas. Contudo, diversas limitações inviabilizaram o alcance desse escopo prático, entre as quais destacam-se:

- a) A impossibilidade de acesso aos detalhes técnicos do projeto das FCT, especialmente quanto às soluções de blindagem eletromagnética utilizadas. Foram consultados Oficiais da tripulação e da gerência do projeto, bem como outras fontes de outras organizações militares, todas sem obter sucesso;
- b) A restrição de informações sigilosas no âmbito militar, que impede a divulgação de dados de engenharia de sistemas navais;
- c) A indisponibilidade de valores e custos de materiais de blindagem, geralmente presentes apenas em catálogos industriais de acesso restrito ou comercializados mediante contratos corporativos (como no caso de fornecedores da MB);
- d) A ausência de experimentação direta em ambiente naval real, uma vez que o estudo se baseia em fontes bibliográficas e documentais.

Diante dessas limitações, a pesquisa concentrou-se em uma análise qualitativa e comparativa da literatura, permitindo a compreensão dos princípios e tendências aplicáveis à realidade dos meios navais, ainda que sem acesso direto a dados específicos das FCT.

3.3 Tratamento dos Dados

Os dados e informações obtidos foram submetidos a análise qualitativa comparativa, buscando identificar convergências e divergências entre autores e normas. Para cada classe de material e técnica, foram levantados os seguintes dados:

- a) Faixas típicas de SE (em dB) em diferentes bandas de frequência (HF, VHF, UHF, banda X);
- b) Principais mecanismos de blindagem (reflexão, absorção e múltiplas reflexões internas);
- c) Vantagens e limitações operacionais, considerando fatores como peso, custo, resistência mecânica e estabilidade em ambientes úmidos e salinos.

A interpretação dos resultados foi apoiada por tabelas comparativas e gráficos conceituais, que sintetizam o desempenho relativo dos materiais e destacam as tendências de aplicação em contextos marítimos e militares.

Essa abordagem qualitativa permite construir um panorama técnico consistente sobre a evolução das soluções de blindagem eletromagnética e sua viabilidade em sistemas eletrônicos embarcados de plataformas navais.

4 RESULTADOS

4.1 Apresentação dos Dados Obtidos Por Meio da Pesquisa Bibliográfica

Tendo como referência os dados obtidos na pesquisa bibliográfica e documental, este trabalho visa apresentar um panorama sobre os materiais testados para blindagem eletromagnética, uma compilação de valores de SE e a identificação de materiais promissores para o ambiente naval.

4.1.1 Panorama Geral dos Materiais Utilizados em blindagem eletromagnética

As pesquisas consultadas a despeito de materiais para blindagem eletromagnética abrangem uma vasta gama de opções, desde metais tradicionais até compósitos avançados e nanomateriais, cada um com propriedades e aplicações específicas. O objetivo deste capítulo é apresentar resultados de materiais que são considerados barreiras eficazes contra a radiação eletromagnética, seja por reflexão, absorção ou múltiplas reflexões internas.

4.1.1.1 Materiais Metálicos e Ferromagnéticos

Os metais representam a solução tradicional para blindagem eletromagnética devido à sua excelente condutividade elétrica, que promove a reflexão das ondas eletromagnéticas. A seguir é apresentada, através do Quadro 4.1, uma comparação entre os metais comumente usados neste tipo de blindagem. Foram utilizados dados e informações extraídos dos trabalhos de White (1980), Souza Júnior (2004), Celozzi, Araneo e Lovat (2008), Sales (2009), Geetha *et al.* (2009), Tong (2009), Ramoa (2015), Gobbi (2018), Zhang (2019), Koo *et al.* (2019), Mishra *et al.* (2019), Shukla (2019), Montenegro (2020), Silvano (2023) e Orasugh e Ray (2023).

Quadro 4.1: Comparação de metais utilizados para blindagem eletromagnética

MATERIAL	SE	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
----------	----	-----------	------------

Cobre	Pode atenuar acima de 100 dB em certas frequências.	• SE muito alta, especialmente contra campos elétricos e ondas planas. Entretanto, é menos eficaz para campos magnéticos de baixa frequência; • Condutividade elétrica e térmica elevada, útil para dissipação de calor; • Boa conformabilidade; e • Boa resistência.	• Peso elevado; • Custo elevado; • Suscetibilidade à corrosão, especialmente em ambientes navais (água salgada); e • Pode sofrer corrosão galvânica quando em contato com metais diferentes (ex: blindagem e junta).
Alumínio e Ligas	Podem atenuar acima de 100 dB em certas frequências	• Alta SE, propiciando um bom desempenho especialmente em regiões afastadas da fonte de campo • Leveza; • Boa disponibilidade e custo relativamente baixo; • Boa resistência mecânica e durabilidade; e • Boa flexibilidade e maleabilidade.	• Baixa resistência ao impacto; • Apresenta condutividade menor que o cobre; e • Menor desempenho em baixas frequências.
Aço e Ligas	Podem atenuar acima de 60 dB, ou até mesmo de 100 dB, em certas frequências	• Alta SE; • Condutividade elétrica e térmica elevada, útil para dissipação de calor; • Boa disponibilidade; • Custo relativamente baixo; e • Boa resistência mecânica e rigidez.	• Peso elevado; • Suscetibilidade à corrosão. O aço inoxidável, entretanto, oferece excelente resistência à corrosão, sendo usado em invólucros de radares navais; e • Sua SE pode diminuir com o aumento da frequência devido à perda de permeabilidade.
Ligas Especiais (Mumetal, Permalloy, Supermalloy)	Podem atenuar entre 35 e 40 dB em certas frequências	• Pode ter resistência à corrosão relativamente boa, a depender da composição da liga; • Permeabilidade magnética muito alta em campos baixos; e • Alta SE, sendo ainda melhor que aço/alumínio em geometrias cilíndricas.	• Sensíveis a estresse mecânico, que pode deteriorar as propriedades magnéticas e a blindagem; • Custo muito elevado; e • Difícil processamento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.2 Polímeros e Compósitos Poliméricos

PICs como PANi e PPy são leves e resistentes à corrosão, sendo uma excelente alternativa aos metais. A blindagem é ajustável através do processo de dopagem, que controla a condutividade. A seguir é apresentada, através do Quadro 4.2, uma comparação entre os polímeros comumente usados neste tipo de blindagem. Foram utilizados dados e informações extraídos dos trabalhos de Faez (2000), Celozzi, Araneo e Lovat (2008), Geetha *et al.* (2009), Martins (2012), Ramoa (2015), Gobbi (2018), Aswathi *et al.* (2019), Koo *et al.* (2019), Mishra *et al.* (2019), Shukla (2019), Antonio (2021), Yao *et al.* (2021), Orasugh e Ray (2023) e Silvano (2023).

Quadro 4.2: Comparação de polímeros condutores utilizados para blindagem eletromagnética

MATERIAL	SE	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
PAni	Blendas (mistura) podem atenuar entre 30 e 75 dB em certas frequências.	- Resistência à corrosão; - Resistente a ambientes ácidos e de alta umidade - Leveza; - Baixo custo; - Facilidade de síntese; e - Condutividade ajustável.	Baixa resistência mecânica e de difícil processamento, necessitando ser usada em compósitos ou blendas.
PPy	Blendas (mistura) podem atenuar entre 26 e 40 dB em certas frequências.	- Resistência à corrosão; - Alta condutividade; - Leveza; - Facilidade de síntese "in situ"; e - Boa estabilidade.	Baixa resistência mecânica e de difícil processamento, necessitando ser usada em compósitos ou blendas.
PAni em Tecidos (ex: Nylon, Vidro)	- Em tecido de nylon podem atenuar entre 30 e 37 dB em certas frequências; e - Em tecido de vidro podem atenuar até 58 dB em certas frequências.	- Boa flexibilidade, ideais para roupas, cortinas e aplicações portáteis; - Resistência à corrosão; - Resistente a ambientes ácidos e de alta umidade; - Leveza; e - Baixo custo.	- Menor durabilidade a lavagens e desgaste; e - SE inferior a soluções rígidas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.3 Nanocompósitos

Nanocompósitos, especialmente aqueles com cargas de carbono como CNTs e Grafeno (ou seus derivados), são materiais emergentes que combinam leveza com alta SE. A alta razão de aspecto dessas cargas permite a formação de redes condutoras em matrizes poliméricas, um fenômeno conhecido como percolação. A seguir é apresentada, através do Quadro 4.3, uma comparação entre os polímeros comumente usados neste tipo de blindagem. Foram utilizados dados e informações extraídos dos trabalhos de Celozzi, Araneo e Lovat (2008), Geetha *et al.* (2009), Martins (2012), Ramoa (2015), Gobbi (2018), Dutta *et al.* (2019), Baltušnikaitė-Guzaitienė e Varnaitė-Žuravliova, (2019), Teli e Valia (2019), Yahyaei e Mohseni (2019), Xu *et al.* (2019), Mishra *et al.* (2019), Arif *et al.* (2019), Shukla (2019), Antonio (2021), Yao *et al.* (2021), Silvano (2023), Liu *et al.* (2023), Zecchi (2024) e Deveci, Çapar e Tezel (2025).

Quadro 4.3: Comparação de nanocompósitos utilizados para blindagem eletromagnética

MATERIAL	SE	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
CNTs	- Quando revestidos com silicone podem atenuar entre 45 e 70 dB em certas frequências. - Quando revestidas com	- A matriz polimérica (ex: epóxi, silicone) pode oferecer excelente resistência à corrosão; - Leveza; - Podem melhorar a resistência da matriz polimérica;	- Dificuldade de dispersão na matriz polimérica; e - Custo elevado.

	Politereftalato de Trimetileno (PTT) podem atenuar entre 36 e 42 dB.	- Alta condutividade; - Excelente propriedades mecânicas e térmicas; e - Alta SE em baixas concentrações.	
Compósitos com Grafeno (GNP/rGO)	- Quando revestidos com Epóxi podem atenuar até 21 dB em certas frequências. - Quando revestidas com Polieterimida (PEI) podem atenuar até 41,5 dB em certas frequências.	- A matriz polimérica (ex: epóxi, silicone) pode oferecer excelente resistência à corrosão; - Leveza; - Podem melhorar a resistência mecânica da matriz polimérica; - Altíssima condutividade elétrica e térmica; - Excelente propriedades mecânicas; e - Alta SE em baixas concentrações.	- Desafios na produção em larga escala e na dispersão homogênea; e - Custo elevado.
Compósitos com CB	Quando revestidos com Polipropileno (PP) podem atenuar até 22 dB em certas frequências.	- A matriz polimérica (ex: epóxi, silicone) pode oferecer excelente resistência à corrosão; - Leveza; - Podem atuar como reforço, dependendo da concentração; e - Custo baixo;	- Baixa SE em baixas concentrações; - Menor performance em frequências altas; - Sujeito a migração/instabilidade ao longo do tempo; e - Maior espessura necessária para alta SE.
Compósitos com CNFs	- Quando revestidas com PP podem atenuar acima de 20 dB em certas frequências. - Quando revestidas com Epóxi podem atenuar até 62 dB em certas frequências. - Compósito de borracha de silicone com CNFs revestidas com Ni podem atenuar até 80 dB em certas frequências. - Quando revestidas com borracha natural/EVA podem atenuar na faixa de 20 dB em certas frequências.	- A matriz polimérica (ex: epóxi, silicone) pode oferecer excelente resistência à corrosão; - Leveza; e - Melhoram significativamente as propriedades mecânicas da matriz.	- Custo elevado; e - Difícil processamento.
Compósitos com Nanofios de Prata (AgNWs)	Quando revestidas com Poliestireno (PS) podem atenuar até 31,85 dB, em	Apesar de nanofios de prata serem suscetíveis à oxidação, o encapsulamento na matriz	- Custo elevado; - Processamento delicado; e - Riscos tóxicos.

	certas frequência, com uma concentração de nanofios de prata de apenas 2,5% do volume.	polimérica adequada pode oferecer proteção; • Apesar da prata possuir maior densidade que o carbono, a baixa fração de carga necessária mantém sua leveza; • Boa flexibilidade (em filmes finos); e • Compatível com aplicações transparentes (ex: telas).	
Compósitos com MXenes	• Quando revestidas com polímeros podem atenuar até de 60 dB em certas frequências. • Quando revestidas com grafeno podem atenuar acima de 65 dB em certas frequências.	• Flexibilidade; • Alta área superficial; • Estabilidade química; • Ótimo material para blindagem mesmo puro; • Leveza; e • Bom processamento e compatibilidade.	• Em concentrações muito altas (acima de 10–15%), podem aumentar a densidade do compósito; e • Custo elevado e disponibilidade limitada ainda restringem o uso em larga escala.
Compósitos Híbridos (ex: CNTs+ Partículas Magnéticas)	Compósitos de silicone com CNTs e magnetita podem atenuar até 45 dB em certas frequências.	• A matriz polimérica (ex: epóxi, silicone) pode oferecer excelente resistência à corrosão; • Leveza; • Pode oferecer blindagem eletromagnética sinérgica e de banda larga; e • Alta estabilidade térmica e química.	• Pode conter componentes com custo elevado; • Exige técnicas de funcionalização para garantir adesão e estabilidade na matriz polimérica; • Dispersão difícil e não uniforme; e • Sensibilidade à umidade (em alguns casos).

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.4 Resultados Comparativos: Soluções Tradicionais Versus Emergentes

Como apresentado no Quadro 4.4, a comparação entre materiais tradicionais (metais) e emergentes (nanomateriais e polímeros condutores) evidencia um *trade-off* entre desempenho de blindagem bruto, peso, custo e multifuncionalidade. Foram utilizados dados e informações extraídos dos trabalhos de White (1980), Sousa Júnior (2004), Celozzi, Araneo e Lovat (2008), Geetha *et al.* (2009), Martins (2012), Ramoa (2015), Gobbi (2018), Aswathi *et al.* (2019), Madhu (2019), Dutta *et al.* (2019), Koo *et al.* (2019), Shukla (2019), Yao *et al.* (2021), Antonio (2021), Silvano (2023), Orasugh e Ray (2023), Liu *et al.* (2023), Zecchi *et al.* (2024) e Deveci, Çapar e Tezel (2025).

Quadro 4.4: Comparação entre soluções tradicionais e emergentes

SOLUÇÕES PARA BLINDAGENS	Tradicionais	Emergentes
MATERIAIS UTILIZADOS	Prioritariamente metais e ligas metálicas como cobre, alumínio, aço e ligas de alta permeabilidade como o Mumetal.	As soluções emergentes focam em compósitos de matriz polimérica (termoplásticos, borrachas, resinas) com enchimentos condutores, que incluem: • Nanomateriais de Carbono: CNTs, CB e CNFs; • PICs: PANI e PPy; • Partículas Magnéticas: Ferritas e nanopartículas de ferro para compósitos híbridos; e • Materiais 2D: MXenes e Grafeno, que apresentam condutividade metálica e boa processabilidade.
TIPO DE MECANISMO	• A blindagem com metais altamente condutores opera primariamente pelo mecanismo de reflexão das ondas eletromagnéticas devido à abundância de elétrons livres; e • Materiais ferromagnéticos são usados para blindar campos magnéticos de baixa frequência através do desvio do fluxo magnético (baixa relutância).	• A principal tendência é projetar materiais com blindagem dominada pela absorção. Isso é alcançado através de perdas dielétricas e/ou magnéticas, onde a energia da onda é convertida em calor; e • Estruturas porosas ou multicamadas são usadas para melhorar a SEM, aumentando a atenuação total.
VANTAGENS	• Alta durabilidade; • Baixo custo metais mais comuns; • Alta condutividade; • Apresentam altíssima SE, muitas vezes superando 100 dB de atenuação; e • São robustos e bem estabelecidos na indústria.	• São leves; • Resistentes à corrosão; • Flexíveis e de fácil fabricação em geometrias complexas; • A SE pode ser ajustada variando-se o tipo e a concentração do aditivo, podendo atingir boa SE mantendo o peso baixo; e • O foco na absorção evita a poluição eletromagnética secundária.
DESVANTAGENS	• Alta densidade (peso elevado); • Suscetibilidade à corrosão (especialmente em ambientes marítimos); • Dificuldade de fabricação em formas complexas; e • A reflexão excessiva pode gerar poluição eletromagnética secundária.	• Atingir a mesma eficácia de blindagem dos metais ainda é um desafio, especialmente em espessuras finas; • Custo elevado em alguns casos; • Condutividade inferior; • Propriedades mecânicas inferiores; • A dispersão homogênea dos <i>nanofillers</i> na matriz polimérica é um desafio técnico crucial que afeta diretamente o desempenho; e • O custo de alguns nanomateriais, como CNTs e grafeno de alta qualidade, ainda é elevado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em síntese, enquanto os metais continuam sendo a referência para blindagem de alta performance onde o peso e a corrosão não são os principais fatores, representando

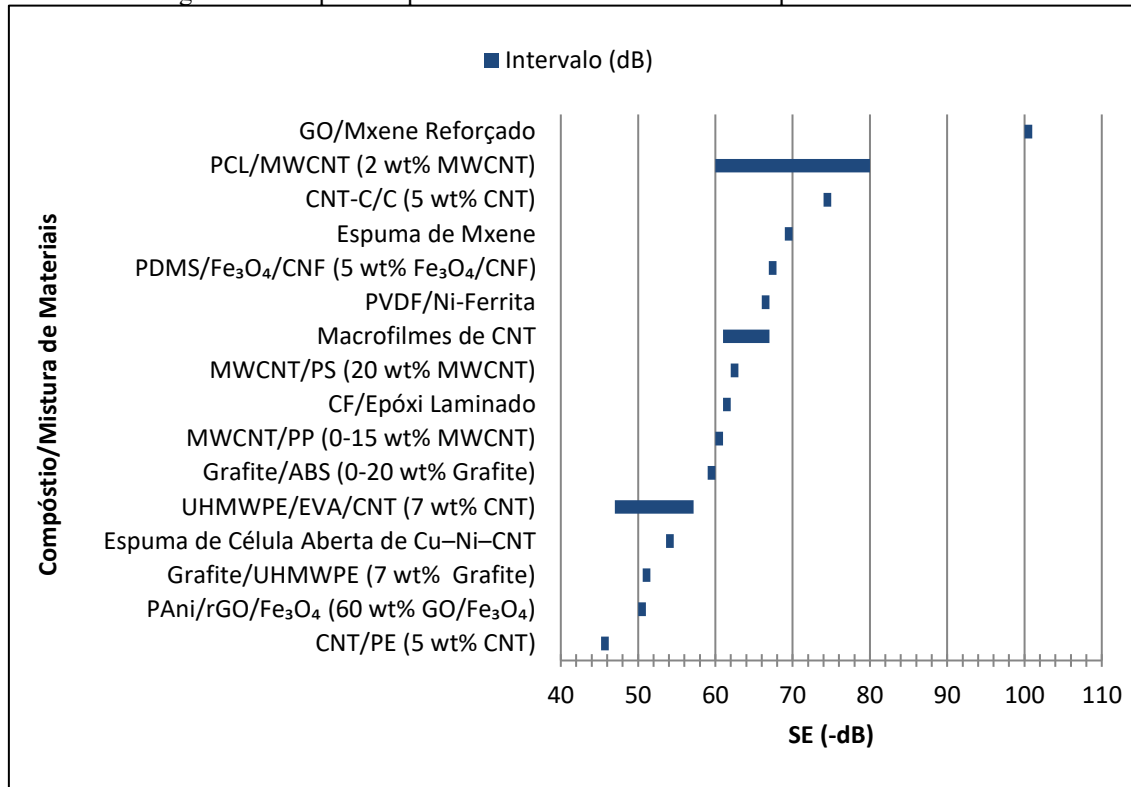
mais da metade da participação global, os nanocompósitos de carbono e os polímeros condutores surgem como soluções leves, resistentes à corrosão e multifuncionais, sendo particularmente promissores para aplicações navais e aeroespaciais, onde cada grama economizado conta e a durabilidade em ambientes agressivos é essencial. As soluções emergentes já apresentam elevada notoriedade na produção global, representando quase a metade do mercado, impulsionadas por um crescimento na casa dos 30% nos últimos anos.

4.1.2 Apresentação de Resultado de Materiais Promissores para Uso em Meios Navais

Dentre os materiais analisados neste trabalho, são apresentados a seguir, na Figura 4.1 e Figura 4.2, o desempenho daqueles considerados promissores para uso em meios navais e que tiveram dados reais de SE apresentados pelos trabalhos de Faez *et al.* (2000), Geetha *et al.* (2009), Ramoa (2015), Dutta *et al.* (2019), Koo *et al.* (2019), Mishra *et al.* (2019), Arif *et al.* (2019), Antonio (2021), Zecchi *et al.* (2024) e Deveci, Çapar e Tezel (2025).

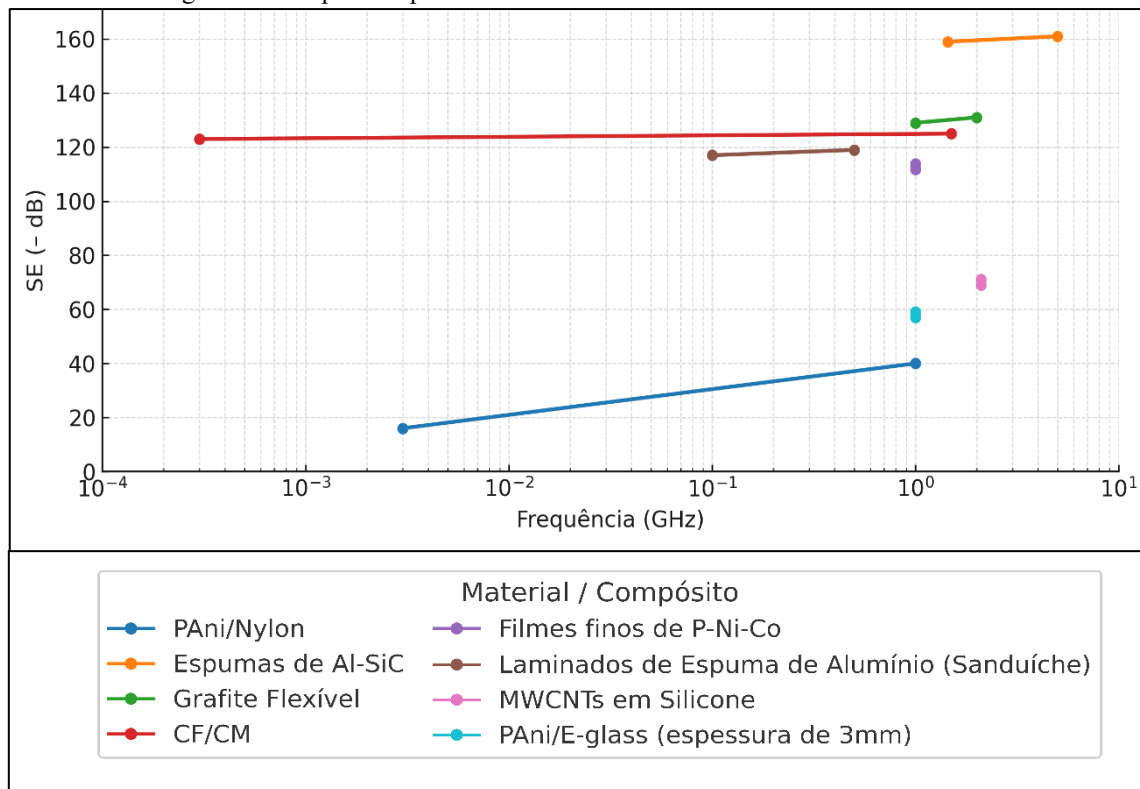
Os compósitos/materiais Polietileno (PE), Magnetita/Óxido de Ferro (Fe_3O_4), Polietileno de Ultra-Alto Peso Molecular (UHMWPE), Liga de Cobre-Níquel (Cu-Ni), Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila (EVA), Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Nanotubos De Carbono de Paredes Múltiplas (MWCNT), Fluoreto de Polivinilideno (PVDF), Ferrita de níquel (Ni-ferrita), Policaprolactona (PCL), Polidimetilsiloxano (PDMS), Carbono/Carbono (C/C), Óxido de Grafeno (GO), Fósforo (P), Cobalto (Co), Compósitos de Alumínio com Carbetto de Silício (Al/Sic) e Matriz de Carbono (CM) são representados por suas siglas, e a expressão “wt%” significa o percentual da substância destacada em relação a massa total.

Figura 4.1: SE por compósito/mistura de materiais em frequências da banda X



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.2: SE por compósito/mistura de Materiais nas faixas de HF/VHF/UHF



Fonte: Elaborada pelo autor.

A faixa de frequência mais comumente testada nos estudos e considerada crítica (associada a aplicações militares e radar naval) é a banda X, que varia de 8 a 12 GHz, desta forma, a Figura 4.1 apresenta um gráfico com os resultados obtidos nesta banda. Já

a Figura 4.2 apresenta um gráfico com os dados de SE obtidos para frequências menores, nas faixas de HF/VHF/UHF, no intervalo entre 3 MHz e 3 GHz.

4.1.3 Apresentação de Dados sobre Técnicas de Medição de SE

A Tabela 4.1 apresenta dados, para comparação, referentes aos principais métodos utilizados para realizar a estimação da SE de materiais. Foram utilizados os trabalhos de Celozzi, Araneo e Lovat (2008), Geetha *et al.* (2009), Ramoa (2015), Daniel e Thomas (2019), Baltušnikaitė-Guzaitienė e Varnaitė-Žuravliova (2019) e Montenegro (2020).

Tabela 4.1 Análise de técnicas de medição de SE

Método	Faixa de Frequência	Vantagens	Limitações
Linha coaxial (ASTM D4935)	30 MHz – 1,5 GHz	Método padronizado e reprodutível entre laboratórios. Apresenta os resultados de componentes refletidos, absorvidos e transmitidos	Limitado em amostras pequenas e planas
Caixa blindada	Limitada, frequentemente abaixo de 500 MHz	Método simples e de baixo custo. Permite comparação rápida de diferentes amostras.	Dificuldade de obter bom contato elétrico entre a amostra e a caixa. Baixa reprodutibilidade entre laboratórios.
Sala blindada (Câmara anecoica)	30 MHz – 40 GHz	Alta precisão. Grande área de amostra e possível avaliação em condições reais	Custo elevado, infraestrutura complexa e de difícil reprodução
Campo aberto (Espaço livre)	Variável (dependente do setup)	Ideal para materiais grandes e de formato irregular. Simula cenários reais de operação naval.	Sensível a reflexões externas e alinhamento. Alta variabilidade nos resultados.
Guia de onda	Faixa específicas	Boa precisão em alta frequência	Restrito a amostras de tamanho fixo e precisas. Faixa de frequências estreitas

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 DISCUSSÃO

5.1 Fatores que Afetam a SE

Como constatado no presente estudo, a EMI no ambiente naval, especialmente no setor militar, representa um desafio crescente devido à complexidade e alta densidade de sistemas embarcados e à limitação espacial. A falha de um subsistema eletrônico por interferência pode comprometer toda a operação da embarcação, incluindo armamentos, comunicação e navegação. A blindagem eletromagnética surge como uma necessidade estratégica para proteger sistemas críticos como radares, comunicações e navegação.

5.1.1 Influência da Condutividade, Permeabilidade Magnética, Espessura e Porosidade na SE.

A SE é o parâmetro quantitativo, medido em dB, que expressa a razão entre a potência da onda incidente e a potência residual transmitida. A atenuação total da radiação é o resultado da SE_R , SE_A e SE_M . O desempenho do material depende intrinsecamente de suas propriedades eletromagnéticas – condutividade elétrica e permeabilidade magnética – e de características como espessura e porosidade.

A condutividade elétrica é o fator principal que determina o mecanismo de reflexão. Materiais com alta condutividade, como metais, possuem portadores de carga móveis que interagem com o campo elétrico incidente, refletindo a maior parte da energia na superfície. A SE é diretamente proporcional à condutividade elétrica do material. Para blindagem por reflexão, o material deve possuir condutividade superior a 1 S/cm. No caso da condutividade ser elevada, o material se comporta como um refletor eletromagnético em detrimento da absorção da densidade de potência (Madhu, 2019; Liu *et al.*, 2023).

A permeabilidade magnética, que está relacionada à capacidade das linhas de campo magnético atravessarem o material, é crucial para o mecanismo de absorção. Materiais com alta permeabilidade magnética, como ligas ferromagnéticas, favorecem a absorção de ondas eletromagnéticas. Para blindar campos magnéticos de baixa frequência é essencial usar materiais com alta permeabilidade. O aumento da permeabilidade favorece o aumento da SE_A e diminuição da SE_R (Zhang, 2019; Zecchi *et al.*, 2024).

A espessura do material contribui diretamente na SE_A e a SE_M . Aumentar a espessura é uma forma de aumentar o desempenho da blindagem. Em contraste, a SE_R é independente da espessura, sendo esta métrica particularmente crítica em baixas frequências. O efeito de múltiplas reflexões internas é geralmente desprezado quando a espessura do material é maior que a *Skin Depth*, sendo esta inversamente proporcional à permeabilidade e à condutividade, demonstrando que, quanto maior a interação do material com a radiação, menor será o seu valor, propiciando a implementação de uma blindagem mais fina (Daniel; Thomas, 2019; Zecchi *et al.*, 2024).

Estruturas porosas ou espumadas são vantajosas, pois reduzem a densidade do material e aumentam o número de interfaces internas, maximizando a múltipla reflexão e o espalhamento, que contribuem para a dissipação de energia e, consequentemente, para o aumento da SE. Em materiais finos, esse efeito pode ser relevante, pois prolonga o caminho da onda, favorecendo a absorção. Contudo, como em blindagens espessas a SE_M pode ser desprezada, a porosidade não é tão relevante (Shukla, 2019; Yao *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2023).

5.2 Análise Crítica dos Resultados Obtidos

Em posse dos resultados apresentados no capítulo 5, é necessário que seja realizada uma análise crítica desses dados e que seja desenvolvida uma discussão visando estabelecer relações de causas e efeitos, comparações e principalmente, que se obtenha uma maior contribuição para eventuais pesquisas e desenvolvimento para a MB.

5.2.1 Metais Tradicionais Versus Compósitos Modernos e Suas Relevâncias em Ambiente Naval

Como evidenciado pelo Quadro 4.4, os materiais metálicos são candidatos adequados para blindagem devido à sua excelente condutividade, mas o uso é limitado onde se exige baixa densidade e resistência à corrosão, como é o caso no ambiente naval. A comparação proporcionada pela Figura 2.6 nos auxilia na tomada de decisão sobre qual desses materiais escolher para uma eventual blindagem eletromagnética, a depender de qual característica será priorizada.

No meio marítimo, é imperativo considerar a compatibilidade galvânica para evitar que a corrosão comprometa a integridade estrutural e a eficácia da blindagem ao longo do tempo. Portanto pôde-se concluir que os materiais promissores para blindagem eletromagnética em meios navais são, em grande parte, aqueles que superam as limitações dos materiais metálicos tradicionais (alta densidade, corrosividade, dificuldade de processamento), focando em soluções leves, resistentes à corrosão, que ofereçam alta capacidade de absorção e com alto desempenho protetivo contra uma variedade de ameaças eletromagnéticas.

Dentre as soluções emergentes, os compósitos poliméricos multifuncionais surgem como alternativas leves e não corrosivas, combinando boas características mecânicas e desempenho de blindagem. Já os compósitos com CNTs e grafeno são particularmente promissores devido à sua alta condutividade e capacidade de formar redes condutoras com baixo teor de concentração. A principal limitação dos materiais emergentes ainda é a falta de padronização e o custo inacessível. Portanto, a comparação entre materiais tradicionais e emergentes evidencia uma relação de compromisso entre desempenho de blindagem bruto, peso, custo e multifuncionalidade.

5.2.2 Análise dos Materiais Amostrados

Neste tópico é realizada uma análise dos resultados obtidos no capítulo 4 deste trabalho referente aos materiais promissores para serem utilizados na blindagem eletromagnética em meios navais.

5.2.2.1 Análise dos Materiais Amostrados em Frequências da Banda X

Como apresentado por Gobbi (2018), valores de SE entre -20 a -30 dB são aceitáveis para a maioria das aplicações industriais, já para aplicações militares é necessário uma SE na ordem de -80 a -100 dB.

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.1, ao se analisar o desempenho dos compósitos/misturas amostrados na faixa de frequência da banda X, pode-se destacar o GO/Mxene como compósito relevante e ideal para o ambiente militar naval pelo fato de atender as especificações de SE necessárias para proteção contra ameaças eletromagnéticas significativas. Além disso Liu *et al.* (2023) apresenta que o uso de GO e MXene sugere um material leve, com alta condutividade e resistência a corrosão.

Compósitos C/C, como o CNT-C/C, são conhecidos por sua dureza, baixa densidade, e alta estabilidade térmica e mecânica. Esta combinação de alta SE e resistência estrutural o torna adequado para uso em componentes estruturais críticos em plataformas militares (Ajitha *et al.*, 2019).

Embora o PCL/MWCNT apresente maiores valores de SE comparados a outras misturas analisadas, a recomendação para o meio naval, que é um ambiente de alta exigência estrutural e corrosiva, exige considerar outros fatores, como a multifuncionalidade. Esta é uma excelente mistura em termos de SE/peso e maleabilidade, mas os MWCNT, podem ter sua eficácia comprometida se não forem devidamente protegidos, pois sua presença em um ambiente salino pode gerar corrosão galvânica se houver contato com outros metais. Além de necessitarem de uma dispersão homogênea, caso contrário a rede condutora pode ser interrompida, reduzindo a eficiência da blindagem. Outro fator de relevância é sua integridade à longo prazo que é uma incógnita, necessitando de ensaios normatizados. (Koo *et al.*, 2019)

Conforme apresentado por Koo *et al.* (2019) e Yao *et al.* (2021), o PDMS/Fe₃O₄/CNF é um excelente material em termos de relação blindagem eletromagnética/peso, mas a matriz PDMS é um elastômero flexível, o que pode não ser o ideal quando se trata de estruturas. Se o requisito for para materiais de blindagem leves e flexíveis (como revestimentos ou gaxetas), ele é superior.

No entanto, se o requisito for para uma estrutura de casco ou painel que exija alta resistência mecânica, o CF/Epóxi Laminado é estruturalmente mais indicado, pois combina SE com resistência mecânica e leveza. Compósitos com resina epóxi são conhecidos por sua estabilidade química e resistência mecânica, que são cruciais em ambientes corrosivos e de grande solicitação mecânica, como o naval. Laminados de CF têm ganhado espaço como substitutos dos materiais metálicos em setores de alta performance, como o aeronáutico/espacial (Antonio, 2021).

O PVDF/Ni-ferrita é outro compósito indicado para uso naval, sendo um polímero com boas propriedades dielétricas. Combina altíssima resistência a névoa salina, UV, hidrocarbonetos e umidade, além de um envelhecimento menor que o poliuretano termoplástico/epóxi padrão. Possui ainda, baixa absorção de água e boa estabilidade térmica; podendo ser aplicada como revestimento ou laminar em painéis/gabinetes, inclusive sobre geometrias complexas. A inclusão de ferritas o torna um MARE que busca otimizar a blindagem pela absorção da onda eletromagnética, favorecendo inclusive seu desempenho como uma técnica *stealth*. Caso se comporte como um material magnetodielétrico, há uma maior possibilidade de ter uma capacidade de absorção em detrimento, reduzindo a re-irradiação no interior de compartimentos (Shukla, 2019).

Em resumo, se o critério for a máxima SE numérica citada nas tabelas das fontes consultadas para a banda X, o GO/Mxene é o compósito mais indicado, tendo uma SE superior a 100 dB. Se a prioridade for um material estrutural (para substituir o metal em grandes componentes), outro candidato relevante é o CNT-C/C sendo o mais alinhado com o conceito de compósitos multifuncionais de elevado desempenho mecânico para aplicações navais.

5.2.2.2 Análise dos Materiais Amostrados em Frequências de HF/VHF/UHF

Analisando a lista de materiais apresentadas na Figura 4.2, em função de requisitos para a aplicação em meios navais e com as informações fornecidas nas fontes, o material que se destaca por oferecer um equilíbrio entre alta eficácia de blindagem e adequação estrutural/química para o ambiente corrosivo naval é o compósito com matriz de PANi reforçado com E-glass com espessura de 3 mm. Mesmo com SE inferior daquela considerada ideal, pela teoria, para um ambiente naval militar, este compósito é particularmente promissor por ser uma modificação de um material estruturalmente robusto (fibra de vidro/matriz polimérica), que possui inércia química superior aos metais (Antonio, 2021). Como apresenta Ramoa (2015), a PANi é um PIC conhecido por sua capacidade de atuar como centro de absorção de radiação, reduzindo a poluição

eletromagnética secundária dentro de compartimentos comumente associadas a blindagens proeminentes de materiais a base de metais, em virtude de sua atenuação se dar primordialmente pela reflexão. Dentre suas vantagens críticas para o ambiente naval é destacável a resistência à corrosão, sua leveza e seu desempenho mecânico, características desejáveis para substituir metais pesados em embarcações.

Embora o PAni/E-glass seja a opção mais equilibrada para estruturação em ambientes navais, outros materiais analisados apresentam maior desempenho absoluto de SE, mas acabam sendo mais ideais para revestimentos, gaxetas ou componentes não estruturais, como os apresentados abaixo:

- a) Com os conceitos apresentados por Deveci, Çapar e Tezel (2025) é observado que os MWCNTs misturados com silicone oferecem grande flexibilidade, estabilidade térmica e resistência ambiental por conta do silicone, aliado a superioridade condutiva dos aditivos de carbono, proporcionando elevados valores de SE_A e, conseqüentemente, de SE total. A alta eficácia o torna excelente para aplicações de navais e aeroespacial.
- b) Filmes finos de P-Ni-Co demonstraram capacidade de blindagem extremamente alta e, embora metálicos, se usados como revestimentos ultrafinos ou em estruturas laminadas são capazes de atender aos requisitos de missão crítica naval (Gobbi, 2018; Modus Engineering Team, 2025).

Alguns materiais apresentaram SE maior que os citados acima, mas acabam sendo menos indicados para o contexto naval estrutural, dentre eles:

- a) Espumas de Al-SiC que são eficazes na blindagem neste ambiente, em parte pelo mecanismo de múltiplas reflexões internas devido à sua porosidade. No entanto, sua matriz de alumínio compromete a durabilidade e a resistência à corrosão, tornando materiais à base de polímeros/nanomateriais carbonosos/PICs uma escolha mais estratégica e promissora para o ambiente naval (Gobbi, 2018; Antonio, 2021).
- b) O Grafite flexível, embora condutivo, é mais frequentemente utilizado em formas não estruturais ou como aditivo em tintas e revestimentos, mas não necessariamente como um laminado estrutural de alta resistência. Embora o grafite seja usado como carga condutora, nanomateriais de carbono e PICs são frequentemente mais estudados em compósitos modernos por permitirem uma melhor dispersão, baixo limiar de percolação e otimização da SE_A quando incorporados em uma matriz (Geetha *et al.*, 2009; Antonio, 2021).

- c) CF/CM são materiais estruturais de alto desempenho e leveza, mas sua aplicação principal é em ambientes de alta temperatura, além de serem extremamente caros e complexos de fabricar em larga escala para estruturas navais (Geetha *et al.*, 2009; Ajitha *et al.*, 2019).
- d) Laminados de Espuma de Alumínio (Sanduíche), que embora leves e com alta SE, são suscetíveis à oxidação superficial à corrosão em ambientes marítimos além de possuírem baixa resistência ao impacto (Geetha *et al.*, 2009; Koo *et al.*, 2019; Mishra *et al.*, 2019).

5.2.3 Análise de Técnicas Utilizadas para a Medição de SE em um Ambiente Naval

Apesar da Tabela 5.1 apresentar dados relevantes para a seleção de técnicas a serem utilizada para medição da SE, a transposição dos resultados de laboratório para o campo real é complexa, e a falta de padronização nos métodos de medição e a complexidade de avaliar a SE em configurações reais dificultam as comparações diretas entre as técnicas. A título de exemplo, embora o método coaxial ofereça alta reprodutibilidade, a sua escolha depende da faixa de frequência e da aplicação. O método de guia de onda está restrito a amostras de tamanho fixo (retangulares, circulares ou elípticas), dependendo da faixa de frequência analisada. Já o método de Campo Aberto, apesar de simular cenários reais de operação naval, apresenta alta variabilidade nos resultados. A câmara anecoica, por sua vez, é de custo elevado e de difícil reprodução (Geetha *et al.*, 2009; Ramoa, 2015; Gobbi, 2018).

Além do mais, mesmo resultados laboratoriais demonstrando o alto potencial de alguns materiais, a falta de ensaios experimentais em ambiente naval real é uma limitação reconhecida, principalmente no cenário das forças armadas, onde um navio de guerra é uma plataforma complexa com sistemas integrados que devem operar simultaneamente. A complexidade e a estanqueidade da construção naval influenciam a discrepância entre valores calculados e medidos de sinais perturbadores. Fatores como condições ambientais severas (corrosão, vibração, flutuações de temperatura) e a presença de aberturas (portas, janelas, cabos) no escudo, que degradam drasticamente a SE teórica, exigem validação correta em campo (Klingelfus, 2019; Katulski; Namiotko, 2019; Silvano, 2023).

5.2.4 Aplicações Práticas e Teóricas

Algumas soluções apresentadas são hipoteticamente aplicadas em meios navais e algumas ainda estão restritas ao nível experimental, como apresenta-se a seguir.

5.2.4.1 Soluções Aplicáveis em Nível Prático Já Possuindo Maturidade Comercial

- a) **Blindagem Metálica Estrutural:** O uso de metais (alumínio, aço inoxidável e ligas ferromagnéticas) em invólucros e estruturas de embarcações representa a base da blindagem devido à sua alta SE e resistência mecânica. O aço inoxidável é preferido para navios devido à resistência à corrosão em contato constante com névoa salina. (Tong, 2009; Yao *et al.*, 2021; Modus Engineering Team, 2025)
- b) **Juntas e Vedantes Condutores:** O uso de elastômeros condutores, malhas de arame flexíveis e juntas de compressão é essencial para manter a continuidade elétrica em compartimentos eletrônicos e cabines de comando, minimizando o vazamento por discontinuidades. (Tong, 2009; Yao *et al.*, 2021; Modus Engineering Team, 2025)
- c) **Tintas e Revestimentos Condutores/Absorvedores:** Polímeros condutores e compósitos com cargas condutoras podem ser usados em revestimentos internos ou tintas condutivas para proteção contra ESD e blindagem. O desenvolvimento de compósitos à base de tinta poliuretânica com CNTs, por exemplo, é uma área promissora para a proteção de ligas de alumínio e avaliação da SE, embora ainda em fase de potencial emergente para aplicações militares. (Faez, 2000; Ramoa, 2015; Gobbi, 2018)
- d) **MARE:** Empregados para reduzir a reflexão em superfícies, onde além de auxiliar na blindagem eletromagnética, também se mostra crucial para a tecnologia *stealth* militar (Ramoa, 2015; Orasugh; Ray, 2023).

5.2.4.2 Soluções Restritas ao Nível Experimental/Emergente

- a) Compósitos poliméricos reforçados com CNTs, grafeno e MXenes oferecem potencial para SE superior a 90 dB com peso mínimo, sendo promissores para sistemas avançados de mísseis e veículos aéreos não tripulados (Yao *et al.*, 2021). No entanto, enfrentam desafios de dispersão, escalabilidade, custo e a necessidade de ensaios em condições operacionais severas, como sugerem os estudos de Gobbi (2018), Silvano (2023) e Deveci, Çapar e Tezel (2025).

- b) O desenvolvimento de materiais com estruturas complexas, como compósitos sanduiche (camadas com gradiente de impedância) ou metamateriais, visa otimizar a SE_A e reduzir a SE_R . Tais designs podem ser altamente eficazes, mas a fabricação precisa e o custo elevado ainda os mantêm em estágio avançado de pesquisa e desenvolvimento (Dutta *et al.*, 2019; Antonio, 2021; Liu *et al.* 2023).
- c) Como apresentado por Silvano (2023) a integração de sistemas de blindagem que se ajustam em tempo real às condições operacionais e ambientais (blindagem adaptativa) é uma área promissora de pesquisa, especialmente em ambientes marítimos dinâmicos.

6 CONCLUSÕES

A aquisição de conhecimento, tanto das propriedades dos materiais quanto dos requisitos específicos da aplicação é essencial para a seleção e implementação de materiais para blindagem eletromagnética em sistemas de defesa. O sucesso da blindagem vai da consideração cuidadosa de todos os parâmetros operacionais, desde o desempenho eletromagnético até a durabilidade ambiental.

O presente trabalho buscou sintetizar os resultados da pesquisa bibliográfica sobre blindagem eletromagnética em meios navais, em conformidade com os objetivos propostos, e apresentar as recomendações fundamentais para o aprimoramento da proteção e confiabilidade dos sistemas eletrônicos de bordo.

6.1 Considerações Finais

Como apresentado por Katulski e Namiotko (2019) e Klingelfus (2019), a EMI no ambiente naval é um risco elevado devido à densidade e complexidade de sistemas operando em um espaço físico restrito. A confiabilidade dos sistemas de navegação e comunicação está diretamente correlacionada à mitigação eficaz de EMI internas e externas.

Silvano (2023) nos apresenta o entendimento que a blindagem eletromagnética se estabelece como uma necessidade estratégica e um pilar fundamental para a proteção, funcionalidade e confiabilidade dos sistemas críticos embarcados. A integridade e a segurança dos sistemas eletrônicos a bordo de navios, sejam eles de guerra ou mercantes, assumem uma importância incontestável na era contemporânea, onde a sua falha por interferência pode comprometer toda a operação, incluindo logística, manobra, combate e segurança.

Os materiais metálicos e suas ligas continuam sendo a solução tradicional e são altamente eficientes na blindagem eletromagnética, atuando primariamente pelo mecanismo de reflexão devido à sua excelente condutividade elétrica. A SE dos metais, em certos casos, é extremamente alta, além deste tipo de material geralmente apresentar uma grande robustez. No entanto, seu uso apresenta limitações significativas em aplicações navais e aeroespaciais, principalmente devido ao peso elevado (alta densidade) e à suscetibilidade à corrosão, um problema acentuado no ambiente marítimo devido à névoa salina e umidade (Geetha *et al.*, 2009; Antonio, 2021; Modus Engineering Team, 2025)

O mecanismo de blindagem primário dos metais, a reflexão, embora eficaz, pode gerar poluição eletromagnética secundária. Nos meios navais, a tendência principal é projetar materiais com blindagem dominada pela absorção em detrimento da reflexão, onde o mecanismo de absorção é mais desejável porque a energia da onda eletromagnética é dissipada no interior do material, geralmente convertida em calor por perdas dielétricas ou magnéticas, além de evitar a poluição eletromagnética secundária e, em compartimentos, reduzir a re-irradiação, o que melhora a EMC entre os sistemas de bordo. MAREs, como os que incluem ferritas (que introduzem perdas magnéticas), buscam otimizar a blindagem pela absorção, favorecendo inclusive seu desempenho em tecnologias *stealth*.

Neste contexto, os compósitos poliméricos e nanomateriais representam o futuro da blindagem eletromagnética. A nanotecnologia, com o uso de CNTs, Grafeno e MXenes, é uma força motriz na inovação de materiais de blindagem. Compósitos e nanomateriais são promissores por oferecerem leveza, resistência à corrosão e flexibilidade, sendo mais adequados ao ambiente naval, considerado agressivo, e às necessidades de redução de peso das embarcações. Compósitos poliméricos multifuncionais combinam boas características mecânicas e desempenho de blindagem, surgindo como alternativas leves e não corrosivas aos metais.

Ao término da pesquisa documental, o presente trabalho buscou oferecer recomendações práticas visando o aprimoramento da utilização de blindagem eletromagnética em meios navais. Abaixo serão citados alguns recursos como forma de fornecer subsídios para implementação mais eficiente em projetos futuros, principalmente àqueles relacionados a MB, como:

- a) O emprego de revestimentos híbridos (metais + polímeros condutores) sendo possíveis soluções em sistemas de pintura e revestimentos híbridos em superfícies metálicas e em gabinetes de equipamentos, especialmente para

garantir proteção contra corrosão e, simultaneamente, fornecer blindagem eletromagnética eficaz.

- b) O desenvolvimento de compósitos à base de tinta poliuretânica com CNTs, que demonstrou potencial emergente para a proteção de ligas de alumínio contra corrosão e blindagem eletromagnética.
- c) Utilização de compósitos poliméricos com inércia química, onde materiais como compósito de PAni com E-glass (fibra de vidro) são estruturalmente robustos e possuem inércia química superior aos metais, sendo uma opção promissora para estruturas navais.
- d) O uso de elastômeros condutores e juntas de compressão, onde tais soluções são essenciais para manter a continuidade elétrica em compartimentos e cabines de comando, minimizando o vazamento por descontinuidades, complementando a blindagem estrutural.

6.2 Lacunas e Oportunidades para Estudo em Meios Navais

Embora a produção científica brasileira demonstre atividade no estudo de compósitos poliméricos, o investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) nacional é vital para superar os desafios técnicos e adaptar materiais avançados às condições operacionais severas do ambiente marítimo. A análise das fontes consultadas revela lacunas específicas e oportunidades de pesquisa no contexto de aplicações navais, tais quais:

6.2.1 Corrosão e Salinidade

Desde estudos mais antigos, como de Geetha *et al.* (2009), até mais recentes como Antonio (2021) e Deveci, Çapar e Tezel (2025), a resistência à corrosão é vista como uma vantagem dos compósitos poliméricos sobre os metais, entretanto as fontes estudadas não contêm dados experimentais ou simulações sobre como a eficácia da SE desses materiais se comporta após exposição prolongada à alta salinidade e umidade – como os encontrados em ambientes marítimos extremos – que são condições que podem degradar tanto a matriz polimérica quanto a interface com as cargas condutoras, e que poderia comprometer tanto as propriedades mecânicas quanto a eficácia da blindagem a longo prazo.

Uma oportunidade para posteriores pesquisas da MB é o estudo do envelhecimento e da durabilidade de compósitos de blindagem (especialmente com

nanomateriais) quando submetidos a ciclos de névoa salina e imersão, avaliando a variação da SE, condutividade e integridade mecânica.

6.2.2 Vibração e Impacto

Como apresenta Klingelfus (2019), navios e submarinos são plataformas sujeitas a constantes vibrações mecânicas e choques, seja pela operação de maquinário pesado ou por condições de mar adversas e operações de combate. A integridade estrutural das blindagens é crucial. A maioria dos estudos consultados foca nas propriedades eletromagnéticas, com menos ênfase na resistência à fadiga e ao impacto desses novos compósitos. A vibração contínua pode levar à delaminação ou à criação de microfissuras, que podem romper as redes condutoras e degradar a eficácia da blindagem.

Investigar o impacto da vibração e de choques mecânicos na SE de compósitos de blindagem é uma oportunidade para posteriores pesquisas e desenvolvimentos da Marinha do Brasil. Onde pode incluir o desenvolvimento de materiais com alta capacidade de amortecimento de vibrações que mantenham a continuidade elétrica, como os elastômeros condutores apresentados por Martins (2012) – e que necessitam de eventual estudo mais detalhado – ou compósitos com matrizes tenacificadas, os quais, neste estudo, não foram encontradas referências que apresentassem dados suficientes sobre esses materiais e suas aplicações.

6.2.3 Integração Multifuncional para Aplicações Navais

O espaço a bordo de um navio, especialmente um submarino, é extremamente limitado. Portanto, materiais multifuncionais são altamente desejáveis. Os estudos de Gobbi (2018); Antonio (2021) e Liu *et al.*, (2023) apresentam que, além da blindagem eletromagnética, é desejável que os materiais utilizados ofereçam proteção estrutural, gerenciamento térmico e, até mesmo, propriedades *stealth* (absorção de radar).

Uma excelente oportunidade para futuras pesquisas e desenvolvimentos da MB é projetar e fabricar compósitos estruturais multifuncionais especificamente para o ambiente naval. Por exemplo, painéis que sirvam como anteparas internas e, ao mesmo tempo, ofereçam blindagem eletromagnética de banda larga e isolamento térmico/acústico. O trabalho de Liu *et al.* (2023) permite inferir que a pesquisa sobre compósitos com gradiente de propriedades, otimizados por manufatura aditiva, pode ser particularmente promissora para essa finalidade.

6.2.4 Efeito de Juntas e Aberturas em Ambientes Navais

Um dos princípios do estudo e aplicação da blindagem eletromagnética é apresentar que a SE de um compartimento – como por exemplo de uma gaiola de Faraday – é reduzida por aberturas, juntas e penetrações de cabos. Em um navio, existem inúmeras dessas descontinuidades. Como sugerem Geetha *et al* (2009), juntas de vedação (EMI *gaskets*) devem não apenas garantir a continuidade elétrica, mas também resistir à corrosão galvânica e à degradação pela salinidade.

Uma oportunidade para futuras pesquisas e desenvolvimentos da MB é o desenvolvimento e teste de materiais de vedação e soluções para passagem de cabos que sejam robustos para o ambiente naval. Dentre os materiais apresentados no artigo *online* Modus Engineering Team (2021), os compósitos elastoméricos condutores, como aqueles a base de silicone ou fluorossilicone, poderiam ser selecionados para serem otimizados e oferecer vedação ambiental (contra água do mar) e elétrica simultaneamente.

Em resumo, as fontes indicam uma transição robusta de materiais metálicos pesados para compósitos leves e multifuncionais. Para a MB, a principal oportunidade de pesquisa reside na validação e otimização desses materiais emergentes sob as condições operacionais críticas de corrosão, vibração e restrições de espaço, garantindo não apenas a eficácia eletromagnética, mas também a durabilidade e a confiabilidade a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- AJITHA, A. R.; SURENDRAN, A.; ASWATHI, M. K.; GEETHAMMA, V. G.; THOMAS, S. Advanced carbon-based foam materials for EMI shielding. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 305–326.
- ANIOŁCZYK, H. EM noise and its impact on human health and safety. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 11–34.
- ANTONIO, P. G. A. **Blindagem eletromagnética em materiais compósitos**: panorama geral e perspectivas futuras, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2021.
- ARIF, P. M.; JAMES, J.; ABRAHAM, J.; NANDAKKUMAR, K.; THOMAS, S. Double percolating EMI shielding materials based on polymer blend nanocomposites. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 393–408.
- ASWATHI, M. K.; RANE, A. V.; AJITHA, A. R.; THOMAS, S.; JAROSZEWSKI, M. EMI shielding fundamentals. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 1–10.
- BALTUŠNIKAITĖ-GUZAITIENĖ, J.; VARNAITĖ-ŽURAVLIOVA, S. Textile based shielding materials. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 219–240.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Estado-Maior do Exército. **MD31-M-05**: Manual de guerra eletrônica para emprego em operações conjuntas. Brasília, 08 dez. 2023.
- CASSIOLATO, C. **EMI–interferência eletromagnética**. [S.l.], 2013. Disponível em: <https://www.profibus.org.br/images/arquivo/pdf-6-543ec6bc451ff.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2025.
- CELOZZI, S.; ARANEO, R.; LOVAT, G. **Electromagnetic shielding**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons–IEEE Press, 2008.
- DANIEL, S.; THOMAS, S. Shielding efficiency measuring methods and systems. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 61–88.

DEVECI, C.N.; ÇAPAR, F.N.; TEZEL, G.B. Recent advances in carbon-based silicone composites for EMI shielding in defense industries: a review. **International Advanced Researches Engineering Journal**, v. 9, n. 2, p. 130-144, 2025.

DUTTA, A.; MISHRA, R. K.; MISHRA, P.; THOMAS, S. Recent progress in electromagnetic absorbing materials. In: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. 147–166.

FAEZ, R.; REZENDE, M. C.; MARTIN, I. M.; PAOLI, M. A. de. Polímeros condutores intrínsecos e seu potencial em blindagem de radiações eletromagnéticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 3, p. 130-137, 2000.

GEETHA, S.; KUMAR, K. K. S.; RAO, C. R. K.; VIJAYAN, M.; TRIVEDI, D. C. EMI shielding: methods and materials—a review. **Applied Polymer Science**, v. 112, n. 4, p. 2073-2086, 2009.

GLOBAL GROWTH INSIGHTS. Electromagnetic interference shielding materials market: global industry analysis, trends and forecast. **Global Growth Insights**, 29 set. 2025. Disponível em: https://www.globalgrowthinsights.com/pt/market-reports/electromagnetic-interference-shielding-materials-market-114416?utm_source=openai. Acesso em: 18 out. 2025.

GOBBI, G. **Avaliação das propriedades protetivas e de blindagem eletromagnética de um sistema de pintura a base de tinta poliuretânica com nanotubos de carbono aplicados sobre a liga de alumínio AA7075**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processo e Tecnologias) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.

KATULSKI, R. J.; NAMIOTKO, R. Topological model of an electromagnetic environment inside a ship for electromagnetic compatibility (EMC) analysis, **Applied Siences**, [S.l.], v. 9, n. 20, n. 2478, out. 2019.

KLINGELFUS, V. T. **Estudo de interferência eletromagnética de radiofrequência entre sistemas de comunicação na faixa de micro-ondas a bordo de um submarino**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de Concentração: Microeletônica) – Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

KOO, C.M.; SHAHZAD, F.; KUMAR, P.; YU, S. Polymer-based EMI shielding materials. In: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 177–218.

LIU, J.; YU, M. Y.; YU, Z. Z.; NICOLSI, V. Design and advanced manufacturing of electromagnetic interference shielding materials. **Materials Today**, v. 66, p. 245-272, 2023.

LOOCK, F. V.; ANDERSON, P. D.; CARDINAELS, R. A monolithic numerical model to predict the EMI shielding performance of lossy dielectric polymer nanocomposite shields in a rectangular waveguide: design of an absorption-based sawtooth-shaped layer. **Applied Mathematical Modelling**, v. 134, p. 108-125, 2024.

MADHU, B. J. Electrical characterization of shielding materials. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 89–108.

MARTINS, N. **Misturas físicas de polipropileno com aditivos condutores**: obtenção, caracterização e aplicação para blindagem eletromagnética. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

METALOCK BRASIL. Eletrônica naval: o que é, como funciona e sua importância para a navegação. **Metalock**, jan. 2021. Disponível em: <https://blog.metalock.com.br/eletronica-naval>. Acesso em: 08 jun. 2025.

MISHRA, R. K.; THOMAS, M. G.; ABRAHAM, J.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Electromagnetic interference shielding materials for aerospace application: a state of the art. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding**: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 327–366.

MODUS ENGINEERING TEAM. Custom gasket materials: choosing the right solution for your application. **Modus**, 13 jan. 2021. Disponível em: <https://www.modusadvanced.com/resources/blog/custom-gasket-materials#q11>. Acesso em: 09 set. 2025.

MODUS ENGINEERING TEAM. Top EMI shielding materials for defense systems. **Modus**, 27 mar. 2025. Disponível em: <https://www.modusadvanced.com/resources/blog/top-emi-shielding-materials-for-defense-systems>. Acesso em: 15 jul. 2025.

MONTENEGRO, K. L. A. **Compatibilidade e interferência eletromagnética**, 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Anhanguera Uniderp, Campo Grande, 2020.

ORASUGH, J. T.; RAY, S. S. Functional and structural facts of effective electromagnetic interference shielding materials: a review. **ACS Omega**, v. 8, n. 9, p. 8134-8158, 2023.

PAUL, C. R. **Introduction to electromagnetic compatibility**. 2. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006.

PENG, Z.; QIN, F. Clarification of basic concepts for electromagnetic interference shielding effectiveness. **Journal of Applied Physics**, v. 130, n. 22, n. 225108, 2021.

RAMOA, S. D. A. da S. **Síntese, caracterização e avaliação da utilização de aditivo condutor nanoestruturado à base de montmorilonita/polipirrol em matriz de poliuretano termoplástico para aplicação em blindagem eletromagnética**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

RODICA, B. A.; GHEORGHE, S.; IANCU, C.; VALENTIN, N. Electromagnetic shielding for the protection of the human factor on board a ship. *In: ISEEE – INTERNATIONAL SYMPOSIUM*, 7., 2021, Galati, Romania. **Anais [...]**. Galati: Universidade "Dunărea de Jos", 2021.

SALES, J. C. M.; MALTA, S. M.; MARTINS, M. I.; RODRIGUES, A. de O. Desenvolvimento de procedimentos de medição da eficiência de blindagem eletromagnética adaptados aos laboratórios de ensino de eletromagnetismo. **Educação e Tecnologia**, v. 14, n. 13, p. 42-51, 2009.

SHUKLA, V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. **Nanoscale Advances**, n. 5, p. 1640-1671, 2019.

SILVANO, M. C. R. **Blindagem eletromagnética em meios navais**, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistema de Controle Elétrico para Navios) – Centro de Instrução Almirante Alexandrino, Rio de Janeiro, 2023.

SOUZA JÚNIOR, M. de. **Estudo de materiais e técnicas para a blindagem de campos magnéticos de frequências industriais**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

TAVARES, M.; GOMES, N. A. S.; RICHTER, R.; GONÇALVES, A. P. Interferência eletromagnética entre radares de emprego naval. *In: SIGE – SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA*, 25., 2023, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2023. p. 208-213.

TE CONNECTIVITY. Electromagnetic interference shielding: a key component of engineering design trends, insights, and design considerations. **TE Connectivity**, jan. 2023. Disponível em: https://my.avnet.com/wcm/connect/80e45461-d1da-4da8-9432-d248dafbb804/EMI_Trend_Paper_FINAL.pdf?MOD=AJPERES&CVID=oOHRPP2. Acesso em: 29 set. 2025.

TELI, M. D.; VALIA, S. P. Graphene and CNT based EMI shielding materials. *In: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). Advanced materials for electromagnetic shielding: fundamentals, properties, and applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. 241–262.

TONG, X. C. **Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group - CRC Press, 2009.

VIEIRA, L. **A Importância das comunicações navais na segurança da Amazônia Azul**. Agência Marinha de Notícias, 28 mar. 2024. Disponível em: <https://www.agencia.marinha.mil.br/defesa-naval/importancia-das-comunicacoes-navais-na-seguranca-da-amazonia-azul>. Acesso em: 08 jul. 2025.

WHITE, D. R. J. **A handbook on electromagnetic shielding materials and performance**. 2. ed. Gainesville, VA: Don White Consultants, 1980.

XU, F.; SHEN, W.; XU, W.; LI, J.; SONG, W. Silver nanowires as shielding materials. *In: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). Advanced materials for*

electromagnetic shielding: fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 289–304.

YAHYAEI, H.; MOHSENI, M. Nanocomposites based EMI shielding materials. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding:** fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. 263–288.

YAO, Y.; JIN, S.; ZOU, H.; LI, L.; MA, X.; LV, G.; GAO, F.; LV, X.; SHU, Q. Polymer-based lightweight materials for electromagnetic interference shielding: a review. **Journal of Materials Science**, v. 56, p. 6549–6580, 2021

ZECCHI, S.; CRISTOFORO, G.; BARTOLI, M.; TAGLIAFERRO, A.; TORSELLO, D.; ROSSO, C.; BOCCACCIO, M.; ACERRA, F. A comprehensive review of electromagnetic interference shielding composite materials. **Micromachines**, v. 15, n. 2, n. 187, 2024.

ZHANG, Q. Magnetic field shielding. *In*: JAROSZEWSKI, M.; THOMAS, S.; RANE, A. V. (Ed.). **Advanced materials for electromagnetic shielding:** fundamentals, properties, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. p. 109–146.