

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

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
GUERRA ELETRÔNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MATERIAIS COMPÓSITOS ABSORVEDORES DE ONDAS
ELETROMAGNÉTICAS EM AMBIENTE NAVAL : Caracterização e
Avaliação de desempenho em absorção do Negro de Fumo na banda X (8
a 12GHz)



PRIMEIRO-TENENTE MATHEUS ISHIARA DUARTE

Rio de Janeiro
2025

PRIMEIRO-TENENTE MATHEUS ISHIARA DUARTE

MATERIAIS COMPÓSITOS ABSORVEDORES DE ONDAS
ELETROMAGNÉTICAS EM AMBIENTE NAVAL : Caracterização e Avaliação de
desempenho em absorção do Negro de Fumo na banda X (8 a 12GHz)

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

1ºTen (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes

Rio de Janeiro

2025

MATERIAIS COMPÓSITOS ABSORVEDORES DE ONDAS
ELETROMAGNÉTICAS EM AMBIENTE NAVAL : Caracterização e Avaliação de
desempenho em absorção do Negro de Fumo na banda X (8 a 12GHz)

PRIMEIRO-TENENTE MATHEUS ISHIARA DUARTE

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

Aprovada por:



Documento assinado digitalmente

ROBERTO DA COSTA LIMA

Data: 27/11/2025 15:16:49-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Roberto da Costa Lima, IPqM



Documento assinado digitalmente

JOAO PAULO DA SILVA QUEIROZ MENEZES

Data: 27/11/2025 14:27:54-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1T (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes, IPqM

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

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2025

1.4cm1

Duarte, Matheus Ishiara

MATERIAIS COMPÓSITOS ABSORVEDORES DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM AMBIENTE NAVAL – Rio de Janeiro: MB/CIAA 2025.

XVII, 42 p.; il.; 29,7 cm.

Orientador: Dr. Roberto da Costa Lima

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

Referências Bibliográficas: p. 42.

1. Comunicação Óptica no Espaço Livre. 2. FSO. 3. Amazônia Azul.

I. Lima, Roberto da Costa. II. Marinha do Brasil, CIAA, Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica. III. MATERIAIS COMPÓSITOS ABSORVEDORES DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM AMBIENTE NAVAL.

Dedico este estudo aos meus filhos, Lara e Luca, que
são minha razão de ser e perseverar e, aos meus pais,
que sempre foram e são meus exemplos e suporte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que a todos guia nos bons caminhos, também ao Dr. Roberto e ao Tenente Menezes, cujas orientações e contribuições se fizeram indispensáveis para o sucesso deste estudo.

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

MATERIAIS COMPÓSITOS ABSORVEDORES DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM AMBIENTE NAVAL

PRIMEIRO-TENENTE MATHEUS ISHIARA DUARTE

NOVEMBRO/2025

Orientadores: Dr. Roberto da Costa Lima; e

1T (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes.

Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica

Este estudo aborda o desenvolvimento e a análise de materiais compósitos absorvedores de radiação eletromagnética com o objetivo de reduzir a assinatura radar de plataformas navais. Inicialmente, são apresentados conceitos fundamentais de eletromagnetismo relacionados à absorção de radiação eletromagnética, não com o intuito de aprofundar a teoria, mas de evidenciar os requisitos e características relevantes ao escopo do estudo. Considerando a complexidade e especificidade do tema, busca-se oferecer ao leitor uma visão completa dos desafios e possibilidades envolvidos. Em seguida, é feito um panorama sobre os diversos tipos de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) conhecidos e suas principais propriedades, com destaque para sua evolução e aplicações. O foco principal recai sobre o uso desses materiais no ambiente naval, com ênfase em plataformas de superfície. Para tanto, o funcionamento básico de sistemas de radar, a principal fonte emissora de interesse no ambiente marítimo, é brevemente discutido, destacando sua relevância para a problemática dos MARE. O trabalho também incorpora uma revisão bibliográfica sobre os avanços e as possibilidades no desenvolvimento desses materiais, buscando conectar os conhecimentos teóricos às necessidades práticas do setor naval. Por fim, são apresentados os resultados experimentais da caracterização eletromagnética de um material compósito dielétrico à base de parafina e negro de fumo. As propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética do compósito foram determinadas na banda de frequência X por meio de medições realizadas em guia de onda com um analisador vetorial de redes. Esses resultados foram utilizados para simular o comportamento do material em diferentes espessuras no software *MATLAB*. A análise e interpretação dos dados obtidos permitem avaliar a viabilidade do compósito como material absorvedor para plataformas navais de superfície, além de determinar a espessura ideal para maximizar sua eficácia em reduzir a assinatura radar.

Palavras-chave: Absorvedores; Compósitos; Eletromagnética; MARE; Materiais; Naval; Superfície; Banda-X; .

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

COMPOSITE MATERIALS AS ELECTROMAGNETIC WAVE ABSORBERS IN NAVAL ENVIRONMENT

PRIMEIRO-TENENTE MATHEUS ISHIARA DUARTE

NOVEMBER/2025

Advisors: Dr. Roberto da Costa Lima; e

1T (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes.

Advanced Improvement Course in Electronic Warfare

This study addresses the development and analysis of electromagnetic radiation absorbing composite materials with the aim of reducing the radar signature of naval platforms. Initially, fundamental concepts of electromagnetism related to electromagnetic radiation absorption are presented, not with the intention of delving deeper into the theory, but to highlight the requirements and characteristics relevant to the scope of the study. Considering the complexity and specificity of the topic, the aim is to offer the reader a complete overview of the challenges and possibilities involved. Next, an overview is provided of the various types of known electromagnetic radiation absorbing materials (ERAM) and their main properties, with an emphasis on their evolution and applications. The main focus is on the use of these materials in the naval environment, with an emphasis on surface platforms. To this end, the basic operation of radar systems, the main source of interest in the maritime environment, is briefly discussed, highlighting their relevance to the issue of MARE. The work also incorporates a literature review on the advances and possibilities in the development of these materials, seeking to connect theoretical knowledge to the practical needs of the naval sector. Finally, the experimental results of the electromagnetic characterization of a dielectric composite material based on paraffin and carbon black are presented. The electromagnetic permittivity and permeability properties of the composite were determined in the X frequency band through measurements performed in a waveguide with a vector network analyzer. These results were used to simulate the behavior of the material at different thicknesses in MATLAB software.

Keywords: Absorber; Carbon Black; Composite; Electromagnetic; Naval; RAM; Vessels.

Lista de figuras

1.1	USS Zumwalt - navio <i>stealth</i> da Marinha dos EUA	2
4.1	Linha do tempo simplificada de desenvolvimento de MARE	5
4.2	Estrutura de um CFRPC.	10
4.3	Negro de fumo.	12
4.4	<i>Carbon Nano Tube</i>	13
4.5	Estrutura molecular do Grafeno	14
4.6	Exemplo de metamaterial interagindo com espectro eletromagnético	14
4.7	Radar: funcionamento básico	15
4.8	Delimitações e denominações do espectro eletromagnético.	16
4.9	F-35 " <i>Lightning II</i> ".	18
4.10	F-22 " <i>Raptor</i> ".	19
4.11	F-35 " <i>Lightning II</i> " visto de frente.	19
4.12	Tabela de RCSs.	20
4.13	Comparativo de RCSs da Fragata com e sem técnicas <i>stealth</i>	22
4.14	Dispersão de chaff (nuvem de fibras de carbono) para proteção naval.	23
5.1	Analizador Vetorial de Rede (N5232A 300kHz to 20 GHz PNA-L network analyzer) da Keysight	24
5.2	Porta amostra. (a) Dimensões do porta amostra em milímetros, (b) Foto do porta amostra com corpo de prova sendo: 1 – acoplador da porta 1; 2 – porta amostra; 3 – trecho de guia de ondas da porta 2 e 4 – corpo de prova.	25
5.3	Tangente de perda dielétrica na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz.	25
5.4	Tangente de perda magnética na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz.	26
5.5	Curvas de Refletividade do compósito parafínico OD: parafina (30:70, % em peso) obtidas na banda X com diferentes espessuras.	26
5.6	Gráfico comparativo.	28

Lista de símbolos

a	Coeficiente de atenuação por histerese magnética
A_e	Área efetiva da antena (m^2)
b	Constante de Rayleigh (H/A)
d	Distância (m)
e	Coeficiente de atenuação por corrente de Eddy
E_r	Campo elétrico refletido (V/m)
E_i	Campo elétrico incidente (V/m)
f	Frequência (Hz)
G	Ganho (dB)
L_{dB}	Atenuação (dB)
$P_{incidente}$	Potência incidente (W)
$P_{refletida}$	Potência refletida (W)
P_t	Potência de transmissão (W)
R	Distância do radar ao alvo (m)
R_{max}	Alcance máximo de um radar (m)
RL	Perda por reflexão (dB)
S_{min}	Menor potência detectável (w)
t	Espessura da amostra (mm)
$W(f)$	Atenuação de densidade de potência em função de uma frequência (dB)
W_h	Perdas por histerese (dB)
$W_{eddy}(f)$	Perdas por corrente de Eddy (dB)
$W_r(f)$	Perdas residuais (dB)
Z_{in}	Impedância de entrada do material (Ω)
Z_0	impedância de entrada do espaço livre (Ω)
Γ	Refletividade de onda eletromagnética
δ	Profundidade pelicular (m)
ϵ_0	Permissividade do espaço livre
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
ϵ_{rs}	Permissividade elétrica estática
$\epsilon_{r\infty}$	Permissividade elétrica de alta frequência
ϵ'	Permissividade elétrica relativa (Parte real)
ϵ''	Permissividade elétrica relativa (Parte imaginária)
λ	Comprimento de onda (m)

μ_0	Permeabilidade do espaço livre
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
μ'	Permeabilidade magnética relativa (Parte real)
μ''	Permeabilidade magnética relativa (Parte imaginária)
σ	Condutividade (S/m) / Seção reta radar do alvo
τ	Tempo de relaxação dielétrica (s)
ω	Frequência angular (rad/s)
$\tan(\delta_\mu)$	Tangente de perdas magnéticas
$\tan(\delta_c)$	Tangente de perdas por condutância
$\tan(\delta_{rel})$	Tangente de perdas dielétricas relativas

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Objetivos	3
2.1	Objetivo Geral	3
2.2	Objetivos Específicos	3
3	Metodologia	4
4	Referencial Teórico	5
4.1	Desenvolvimento de MARE - Breve Histórico	5
4.2	Fundamentos da Absorção de Ondas Eletromagnéticas	5
4.2.1	Casamento de impedâncias	6
4.2.2	Dissipação magnética	7
4.2.3	Dissipação dielétrica	8
4.2.4	Considerações parciais	9
4.3	Materiais absorvedores	9
4.3.1	Compósitos	10
4.3.2	MARE a base de Grafeno	13
4.3.3	Metamateriais	13
4.4	Radares e assinaturas radar	15
4.4.1	Princípios de funcionamento	15
4.4.2	Assinatura radar	17
4.4.3	Tecnologia <i>Stealth</i> e a redução da RCS	18
4.4.4	Aplicabilidade operativa	21
5	Caracterização eletromagnética de compósito parafínico dielétrico	24
5.1	Propriedades eletromagnéticas do compósito	25
5.1.1	Permissividade complexa na banda X	25
5.1.2	Permeabilidade complexa na Banda X	25
5.1.3	Medida de refletividade do compósito	26
5.1.4	Análise comparativa do material produzido	27
6	Conclusões	30

1 Introdução

No interesse de se controlar ou dominar uma área militarmente, existem diversas maneiras de se obter vantagens operativas sobre o oponente. Atualmente, muitas das principais formas de se conseguir isso estão diretamente ligadas à sua capacidade de detecção ou de evitá-la.

O ramo que mais interessa essa dinâmica é chamada Guerra Eletrônica, cuja importância cresce à mesma medida do desenvolver das tecnologias de sensores e equipamentos eletrônicos. Assim como aquele que outrora dominava os espaços aéreos obtinha vital vantagem sobre o oponente, é seguro dizer que atualmente quem melhor dominar a Guerra Eletrônica logrará o mesmo êxito.

Dentro dessa seara se desenvolvem diversas áreas, dentre as quais estudos e pesquisas produzem os mais diversos dispositivos que objetivam detectar outro meio. Naturalmente haveria o outro lado da moeda, em que se ensaja impedir ou dificultar sua própria detecção. Dessa forma desde o início do século se pode observar uma crescente na produção e emprego dos meios furtivos. Já tendo provado sua vantagem em operações nas últimas décadas do século XX, uma tecnologia cada vez mais difundida e cujas características se tornam de crescente interesse às maiores forças armadas do mundo.

As silhuetas angulares e aspecto futurista imediatamente denunciam a capacidade *stealth* de um meio. Embora o senso comum possa trazer à mente a idéia de que esse meio necessariamente deve ser dotado de extraordinária habilidade de camuflagem, ao ponto de desvanecer de todo e qualquer sensor, a realidade não é tão estrita e absoluta assim.

Certamente é razoável de se imaginar que essa característica seja bem aplicada a meios de menor porte como aeronaves, mas esse feito pode não ser tão simples de se conseguir em plataformas maiores, como os meios de superfície. Ainda assim, pode-se implementar essa tecnologia nos navios com interessantes e vantajosos resultados. O USS "Zumwalt", da Figura 1.1, com sua silhueta peculiar, deixa bem explícita a preocupação do projeto com a detectabilidade da plataforma, embora existam outros mais sutis no meio naval com a mesma preocupação. Isso se deve ao fato de que a furtividade desses meios não se encontra unicamente em sua geometria, mas grandemente a utilização de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE).

Embora os MARE possam aparentar uma novidade tecnológica, as pesquisas e desenvolvimento desses materiais remontam há muito mais décadas. Ainda que seu uso não se restrinja ao meio militar, este será o foco de sua aplicação neste trabalho, mais especificamente voltado ao ambiente naval.

Na literatura, os materiais absorvedores de radiação eletromagnética são geralmente classificados em três grandes categorias, de acordo com o principal mecanismo de atenuação: materiais dielétricos, materiais magnéticos e materiais híbridos. Os absorvedores dielétricos promovem perdas associadas à polarização e condução elétrica; os magnéticos, por sua vez, baseiam-se nas perdas por histerese e relaxação magnética; já os híbridos combinam ambos os mecanismos, resultando em uma absorção mais ampla e eficiente em diferentes faixas de frequência.

No interesse desse íterim este trabalho empregará o negro de fumo como fase absorvedora em uma matriz dielétrica de parafina. O negro de fumo destaca-se por sua

elevada condutividade elétrica, estabilidade térmica, baixo custo e facilidade de dispersão na matriz polimérica, características que o tornam um excelente candidato para compósitos absorvedores leves e de alto desempenho.

Figura 1.1: USS Zumwalt - navio *stealth* da Marinha dos EUA



Fonte: Poder Naval. Disponível em: <https://www.naval.com.br>

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Este documento visa estudar as características dos materiais compósitos, com enfoque na interação destes com o espectro eletromagnético e na viabilidade de aplicação em um meio de superfície.

2.2 Objetivos Específicos

- Levantamento teórico dos fundamentos da absorção eletromagnética;
- Levantamento teórico dos principais materiais compósitos aplicados como MARE na literatura;
- Avaliação experimental da absorção eletromagnética de um material compósito à base de parafina e negro de fumo;
- Simulação em *MATLAB* do comportamento eletromagnético do material compósito em diferentes espessuras;
- Análise e considerações quanto à viabilidade de aplicação do negro de fumo como MARE em meios de superfície.

3 Metodologia

A metodologia empregada consistiu, inicialmente, na realização de pesquisas na literatura científica nacional e internacional a respeito dos seguintes aspectos: fundamentos de eletromagnetismo, materiais absorvedores em geral, assinaturas de radar e uso de MARE em meios militares.

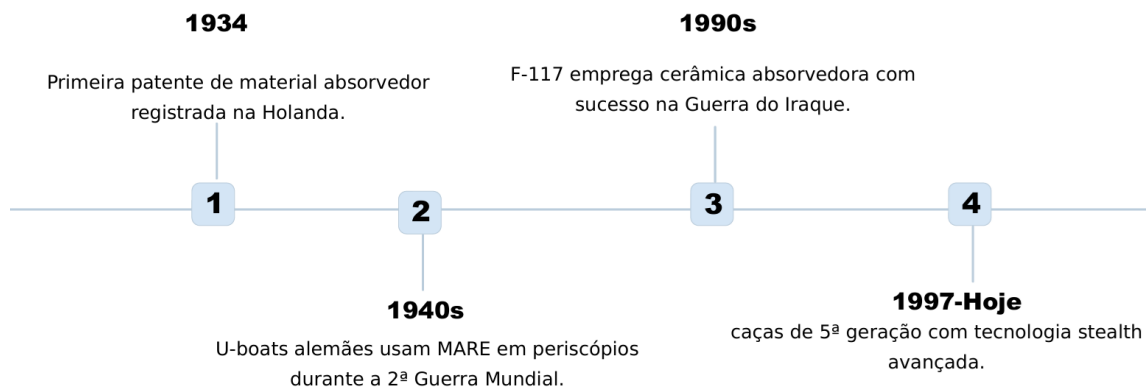
Em seguida, foi selecionado um material compósito à base de parafina e 20% em massa de negro de fumo, material este confeccionado no Instituto de Pesquisa da Marinha (IPqM). Sua espessura foi determinada experimentalmente por paquímetro. Os parâmetros eletromagnéticos do compósito foram determinados por um guia de ondas utilizando-se de um Analisador Vetorial de Redes, na banda X equivalente à faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz. Os valores experimentais obtidos foram utilizados como dados de entrada para a simulação em *MATLAB*, visando o cálculo de seus valores de refletividade em espessuras variando de 1 a 5 mm com passo de 0,5 mm e, desta forma, inferir sobre o seu comportamento absorvedor de micro-ondas, nesta faixa de frequência.

4 Referencial Teórico

4.1 Desenvolvimento de MARE - Breve Histórico

Embora possa aparentar uma tecnologia de concepção recente, os MARE se encontram em desenvolvimento desde meados da década de 30. A primeira patente de um material absorvedor de radiação eletromagnética foi registrada em 1934 na Holanda. Ainda durante a 2ª Guerra Mundial, foram produzidos e empregados MARE em plataformas militares, a exemplo dos U-boot alemães, cujos periscópios eram revestidos com um material absorvedor para dificultar a detecção por radar quando navegando na cota periscópica (ENRIQUE et al., 2014).

Figura 4.1: Linha do tempo simplificada de desenvolvimento de MARE



Fonte: Produzido pelo autor

Com o decorrer das décadas e o desenvolvimento tecnológico, as técnicas de design de materiais absorvedores evoluíram. As frágeis espumas piramidais para câmaras anecoicas, já empregadas nas décadas de 60 e 70; os absorvedores Jaumann com camadas de resistividades distintas dos anos 80; o material cerâmico empregado nas aeronaves F-117 da *United States Airforce* (USAF), cujo projeto de linhas peculiares encontrou sucesso operacional durante a Guerra do Iraque na década de 90 (WARREN, 2007); até dois dos mais proeminentemente conhecidos caças da atualidade, F-22 “*Raptor*” e F-35 “*Lightning*”, caças de 5ª geração, cujo primeiro voo do F-22 foi registrado em 1997, já com grande eficácia em técnicas de furtividade, capacidade de ocultação eletromagnética que se dá, em parte, pelo uso de MARE (RICHTER, 2020); (ARONSTEIN, 1998).

4.2 Fundamentos da Absorção de Ondas Eletromagnéticas

Torna-se eminentemente necessário discorrer, mesmo que abreviadamente, sobre o comportamento das ondas eletromagnéticas para que se compreenda de que forma os materiais absorvedores podem atuar nessa densidade de potência propagada.

A absorção de ondas eletromagnéticas é um procedimento em que a densidade de potência, ou potência, contida na onda é atenuada e subsequentemente transformada em outra forma de densidade de potência. Há três processos que ocorrem quando a radiação eletromagnética interage com uma substância: reflexão, refração e absorção. No caso desta última interação, que mais interessa a este estudo, ressaltam-se duas características essenciais para que um material apresente excelente absorção: casamento de impedância entre o espaço livre e a superfície do substrato, de forma a evitar a reflexão; e o material deve ser capaz de absorver a maior quantidade possível de densidade de potência (o que exige alta perda dielétrica e/ou magnética)(SOYZA; YOUSIF; LIU, 2024).

Ainda no estudo realizado por Soyza, Yousif e Liu (2024), são muito bem detalhadas as diferentes formas de perdas, ou dissipação de densidade de potência, que ocorrem quando a radiação eletromagnética interage com alguma substância. Listam-se mecanismos de perdas magnéticas, que por sua vez se desdobram em três formas: perda por histerese, perda residual e perda por corrente de Eddy; há também as perdas por força dielétrica, que por sua vez se correlacionam às perdas por relaxação dielétrica, perdas por condutância, perda por ressonância, dentre outras perdas que resultem em dissipação de calor.

Segundo Jin et al. (2024), os princípios para desenvolvimento de MARE mais difundidos são: casamento de impedância, dissipação magnética, dissipação dielétrica e múltiplas reflexões.

4.2.1 Casamento de impedâncias

O casamento de impedância consiste em considerar o modelo de linha de transmissão que representa uma camada única e homogênea absorvedora sobre um fundo metálico. Considera-se a superfície metálica de fundo como um condutor ideal (condutividade infinita). Dessa forma, a onda apenas conseguiria penetrar sua superfície, sendo completamente refletida pelo fundo metálico. Considerando o fundo como uma carga de curto-circuito, cuja impedância seria $Z_L = 0$, a propagação da onda apenas ocorreria no ar e no revestimento absorvedor, gerando perdas na reflexão. Esse princípio parte da perspectiva do modelo de linha de transmissão, em que Figuram partes do circuito o ar e o MARE. Assim, a perda por reflexão é descrita pela equação 1 (JIN et al., 2024).

$$RL = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1)$$

Na qual RL, do inglês *Reflection Loss*, representa a perda por reflexão, Z_0 é a impedância do espaço livre e Z_{in} , a impedância de entrada do revestimento. Enquanto Z_{in} é calculada pela equação 2

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \tanh \left\{ j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right\} \quad (2)$$

Em que ' ε_r ' é a permissividade relativa, ' μ_r ' a permeabilidade relativa, ' d ' é a espessura do material, ' f ' é a frequência da onda eletromagnética incidente e ' c ' é a velocidade da luz no vácuo. Portanto, se a impedância de entrada for igual à impedância do espaço livre ($Z_{in} = Z_0$), a perda por reflexão (RL) tende a infinito (JIN et al., 2024). Nesse caso, a densidade de potência incidente é predominantemente transmitida para o interior do material, onde poderá ser parcialmente absorvida conforme suas propriedades dielétricas

e magnéticas.

4.2.2 Dissipação magnética

A perda por dissipação magnética é determinada pela componente imaginária da permeabilidade. Em função dessa característica, ocorre a magnetização e a magnetização reversa dos componentes magnéticos do MARE. (JIN et al., 2024).

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (3)$$

Na equação 3 se descreve a permeabilidade relativa μ_r e as suas componentes real (μ') e imaginária (μ''). Ainda há uma perda magnética aparente correlata à perda tangencial da permeabilidade, calculada pela quação 4 (JIN et al., 2024).

$$\tan(\delta_\mu) = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (4)$$

Quanto as já mencionadas perdas por histerese, por corrente de Eddy e perdas residuais, se expressa a atenuação de densidade de potência em função de uma frequência (f) conforme a equação 5.

$$W(f) = W_h + W_{eddy}(f) + W_r(f) \quad (5)$$

Na qual W_h é a perda por histerese, $W_{eddy}(f)$ é a perda por corrente de Eddy e $W_r(f)$ representa as perdas residuais (JIN et al., 2024). Uma substância exposta a um campo magnético com fluxo alternado gera uma tensão induzida de campo próximo, mesmo dentro da própria substância, dissipando densidade de potência. Esse fenômeno é atribuído à perda por corrente de Eddy. O coeficiente de atenuação por corrente de Eddy (e), apresentado na equação 6 quantifica a perda com campos de baixa densidade de fluxo magnético e baixa frequência (SOYZA; YOUSIF; LIU, 2024).

$$e = \frac{4\pi 2\mu_0 d^2 \sigma}{3} \quad (6)$$

Seu valor varia em função da condutividade e da espessura do material. Ainda assim, de Soyza, Yousif e Liu (2024) ressalva que materiais de alta condutividade apresentam permeabilidade instável em altas frequências.

A perda por histerese magnética é gerada por movimento irreversível do domínio magnético e pelo momento magnético aplicado ao spin do material, respectivamente. Quanto menor a concentração do fluxo magnético, menor o coeficiente dessa atenuação, que se descreve pela equação 7.

$$a = \frac{8b}{3\mu_0\mu^3} \quad (7)$$

Sejam respectivamente μ_0 , b e μ a permeabilidade no vácuo, a constante de Rayleigh e a permeabilidade do material .

Por fim, definem-se como perdas residuais quaisquer outras perdas magnéticas que não sejam por histerese ou corrente de Eddy. De Soyza (2024) exemplifica que, para o caso de baixas frequências da onda incidente, as perdas residuais ocorreram basicamente

por pós-efeitos magnéticos, como instabilidade termodinâmica ou histerese de determinados íons e elétrons que se ajustam às suas posições de equilíbrio independentemente da presença do campo magnético. Essa forma de perda obedece à variabilidade do campo magnético, pelo período de relaxação do material e pela amplitude. Ressonância ferromagnética, ressonância por tamanho, ressonância por barreira de domínio e ressonância natural contribuem para perdas residuais em frequências muito altas (SOYZA; YOUSIF; LIU, 2024).

4.2.3 Dissipação dielétrica

A atenuação de densidade de potência eletromagnética em materiais dielétricos, genericamente, converte a potência da onda em densidade de potência térmica. Essa conversão pode ocorrer principalmente por meio de perdas de relaxação dielétrica ($\text{tg}\delta_{rel}$), perdas de condutância ($\text{tg}\delta_c$), perdas de ressonância dielétrica ($\text{tg}\delta_{res}$), dentre outras. O parâmetro fundamental do material para determinar sua capacidade de gerar perdas por dissipação dielétrica é a permissividade relativa (ϵ_r), que se descreve por pela equação 8.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (8)$$

Na qual ϵ' corresponde à parcela real e ϵ'' à parcela imaginária da permissividade. Assemelhada à atenuação magnética, há também uma perda aparente relacionada à tangente, neste caso associada à permissividade, sendo descrita pela equação 9.

$$\tan(\delta_\epsilon) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (9)$$

No caso de um campo oscilante interagindo com um MARE de certa condutividade, tal material produz uma corrente de condutância, dissipando, assim, a densidade de potência em forma de calor. Portanto, a perda por condutância é regida pela condutividade elétrica do material, conforme a equação 10, na qual σ é a condutividade, f é a frequência e ϵ_r é a permissividade relativa.

$$\tan(\delta_c) = 1,8 \cdot 10^{10} \frac{\sigma}{f\epsilon_r} \quad (10)$$

O material exposto a um campo elétrico passa a ficar polarizado, mas, se a taxa de variação da polarização é inferior à do campo elétrico incidente, ocorre uma perda por relaxação dielétrica. Existem diversos fenômenos que abrangem a polarização no material, dentre as quais se destacam a polarização por deslocamento eletrônico, polarização de rotação de dipolo, polarização iônica e polarização de ionização. Em função dos tempos necessários para que as polarizações iônica e por deslocamento eletrônico ocorram, a perda, por essas causas, é mais expressiva em frequências extremamente altas. Em função desse fator de tempo, as polarizações por rotação de dipolo e ionização térmica contribuem sobremaneira para a perda de relaxação em altas frequências. A perda é descrita pela tangente de relaxação dielétrica na equação de Debye, descrita pela equação 11.

$$\tan_g \delta_{rel} = \frac{\epsilon'' r(\omega)}{\epsilon' r(\omega)} = \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty})\omega\tau}{\epsilon_{rs} + \epsilon_{r\infty}\omega^2\tau^2} \quad (11)$$

As perdas por ressonância ocorrem quando a frequência da onda eletromagnética co-

incide com a frequência natural de oscilação dos dipolos elétricos ou dos momentos magnéticos presentes no material absorvedor, resultando em forte dissipação de densidade de potência.

Se um revestimento for fino o suficiente, ocorrerão múltiplas reflexões. Neste caso, a onda eletromagnética, ao penetrar na interface frontal, será refletida pela interface de trás viajando para a interface frontal novamente. No processo de reflexão, a densidade de potência é dissipada. Entretanto, se a espessura do revestimento for maior que a profundidade pelicular, a dissipação se torna negligenciável; já no caso de ser menor que essa medida, a densidade de potência não sofre atenuações significativas. Essa profundidade pelicular (δ) pode ser calculada pela equação 12, em que σ é a condutividade do revestimento e μ é a permeabilidade (JIN et al., 2024); (SOYZA; YOUSIF; LIU, 2024).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (12)$$

4.2.4 Considerações parciais

Ao se projetar um material que se pretenda absorver radiação eletromagnética, devem ser considerados diversos aspectos da sua natureza, dentre as quais se destacam suas características magnéticas e dielétricas, bem como sua estrutura física e molecular no tocante às dimensões e tipo de material (JIN et al., 2024).

É muito desejável, de diversas perspectivas, que exista um único material barato e versátil com todas as características de dissipação eletromagnética e, ao mesmo tempo, resistente a todas as condições externas de degradação e ainda facilmente adaptável a qualquer aplicação.

Naturalmente, esse material não existe; assim, os materiais absorvedores são tão diversos quanto suas peculiaridades de projetos, que devem prever faixas de frequência priorizadas, tolerância térmica desejada, resistência à abrasão climática, tipo de aplicação, diferentes custo de produção dentre outras especificidades que giram em torno da aplicabilidade.

4.3 Materiais absorvedores

No intuito de desenvolver um panorama, discutir-se-á brevemente sobre alguns dos tipos de materiais encontrados na literatura e suas características. Antes de apresentar alguns dos materiais, ficou claro, mediante as pesquisas realizadas, que não existe uma separação muito clara entre eles. Isso se deve à sua grande diversidade de composições e estruturas. Existem, de fato, alguns grupos, mas não serão todos categoricamente listados, dada a multiplicidade de indexações encontradas e o elevado número de materiais distintos.

Neste trabalho, uma vez escolhidos a parafina e o negro de fumo como compósito absorvedor eletromagnético, buscou-se direcionar a pesquisa bibliográfica para estudos envolvendo materiais compósitos dielétricos à base de carbono, visando estabelecer parâmetros comparativos e referências de desempenho entre diferentes composições empregadas como MARE.

4.3.1 Compósitos

Definem-se os materiais compósitos como misturas, no nível macroscópico, não solúveis, de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades que se combinam e em que um dos materiais garante a ligação (que é denominado matriz), enquanto o outro é a estrutura, ou reforço. As propriedades de absorção de um compósito podem ser alteradas em função de variações na geometria, morfologia e composição do material (AHMAD et al., 2019). Dessa forma, visando aliar propriedades eletromagnéticas e estruturais, os compósitos são amplamente empregados como materiais absorvedores de radiação eletromagnética, com grande potencial para aplicação naval. Nos subtópicos a seguir serão descritos alguns dos principais componentes descritos na literatura.

MXene são exemplos de MARE compósitos, constituídos de um grupo bidimensional de materiais consistindo de carbonídeos e carbonitretos metálicos de transição rápida. São potenciais absorvedores devido à alta condutividade, permissividade e imperfeições interfaciais, as quais contribuem para dissipação dielétrica.

Ainda que tenham sido observadas dificuldades no casamento de impedâncias, o MXene, sendo preparado em compósito, pode mitigar essa deficiência (JIN et al., 2024).

Carbonosos, como o nome sugere, são compósitos cujo reforço é um material à base de carbono. Os compósitos à base de carbonáceos oferecem alta flexibilidade de design e de controle de propriedades, já que, sendo um compósito, as modificações e otimizações podem ser realizadas ao se variar a proporção do carbonáceo na matriz. Ademais, as propriedades de absorção também podem ser personalizadas, alterando a geometria, morfologia e composição (AHMAD et al., 2019).

Compostos poliméricos reforçados com fibra de carbono, ilustrado na Figura 4.2, é um tipo de compósito, do inglês *Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites* (CFRPCs), que tem recebido grande atenção de estudos por apresentarem propriedades mecânicas excepcionais em comparação a outros materiais de baixa densidade. Deve-se atentar para a composição com esse material, pois são praticamente refletores em compósitos com altas concentrações de fibra de carbono (acima de 60%). Dessa forma, tendem a ser melhor empregados como interferidores, em lugar de absorvedores (AHMAD et al., 2019).

Figura 4.2: Estrutura de um CFRPC.



Fonte: (ZHAO et al., 2019).

Dentre algumas formas de CFRPCs de Fibra Contínua, há os de fibra de carbono ativadas, ou *Activated Carbon Fiber* (ACF), que conseguem incrementar consideravelmente

a distância de reflexão da onda dentro do material por uma distância maior. Podem ser estruturadas em um formato específico denominado filme de feltro de fibra de carbono, os quais são análogas às superfícies seletivas de frequência tradicionais, seja na forma vertical ou de ligação cruzada, e são incorporadas em uma matriz epóxi. A absorção pode ser incrementada usando uma combinação de diferentes tipos de filmes. As fibras de carbono são conectadas para formar uma rede complexa, o que aumenta as características de absorção do compósito;

As CFRPCs de Fibra Curta, como partículas de preenchimento, podem ser amplamente usadas em matrizes poliméricas e são extensivamente empregadas para a absorção de micro-ondas. Seus mais significativos benefícios são a possibilidade de uma banda larga de absorção em micro-ondas e pequena espessura, bem como um alto valor de permissividade com pequenas proporções de inclusão. Podem ser utilizados em compósitos multicamada, com a benesse de uma banda de absorção consideravelmente ampliada. Outra forma de emprego desse material é a preparação de um compósito híbrido multicamada, em que o material de fibras curtas de carbono é misturado a outras partículas de preenchimento(AHMAD et al., 2019).

O negro de fumo (NF), ilustrado pela Figura 4.3 é encontrado na literatura estrangeira como *Carbon Black*, é comumente utilizado para alterar as propriedades ópticas, elétricas e mecânicas de um compósito. A absorção eletromagnética é mais uma aplicação importante desse material. Em comparação com a Ferrita Magnética, o negro de fumo mantém o desempenho eletromagnético em uma faixa de frequência mais larga, alcançando a faixa dos tera-hertz (THz) em decorrência da menor densidade e pelo tamanho das partículas. Ainda que essa estratégia não seja exclusiva a esse material, podem-se utilizar múltiplas camadas para ampliar a banda de absorção.

No caso da camada única Wu *et al.* (2008) apud Ahmad et al. (2019) apresentam exemplos de negro de fumo como base de nanocompósitos cuja máxima absorção foi de 40 dB na banda X, tendo usado para esse resultado uma concentração de 30% de negro de fumo. Oh *et al.* (2004) apud Ahmad et al. (2019) obtiveram um resultado de uma absorção máxima de 32dB para uma largura de faixa de 2.7 GHz na banda X, utilizando 6% de negro de fumo em uma matriz mista de fibra de vidro e epoxy. Kwon *et al.*(2002) apud Ahmad et al. (2019) como resultado de seu estudo, apresentam um compósito de borracha e silicone com negro de fumo, performando uma atenuação mínima de 24 dB para uma largura de faixa de absorção de 3.9 GHz na banda X. A dispersão do negro de fumo se torna dificultada se a concentração está distante do limiar de percolação calculado, sendo um fator importante para melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos de negro de fumo.

Diversos pesquisadores afirmaram que as capacidades de absorção eletromagnética dos compósitos de negro de fumo podem ser melhoradas por catalisá-lo com outras substâncias que tenham limiar de percolação maior e melhores características de absorção. As características de absorção podem também ser controladas por meio de estresse mecânico.

MARE de múltiplas camadas são compostos por um conjunto de camadas com diferentes materiais absorvedores, para assim, aumentar as características gerais de absorção. Uma das dificuldades encontradas nesse modelo é minimizar o coeficiente geral de reflexão para a gama específica de ângulos de incidência e banda de frequências. A camada frontal é projetada para ter excelente casamento de impedância com o ambiente, enquanto a camada de absorção é colocada para dissipar a densidade de potência eletromagnética e

a camada de substrato cumpre o propósito de ser um meio refletivo para evitar qualquer fuga de ondas eletromagnéticas. Um exemplo de estrutura multicamada recomendada como MARE é composta de uma camada fibrosa com resina termo-ajustada, como reforço compósito polimérico de fibra de vidro, uma camada de resina reforçada, como compósito polimérico de fibra de carbono e uma camada de borracha aditivada de negro de fumo. Esse material apresenta dois principais benefícios: aumento na absorção e uma espessura reduzida pelo uso da camada de casamento de impedância; e mais opções disponíveis para otimização das características de absorção modificando os materiais de cada camada, ou os seus parâmetros (AHMAD et al., 2019).

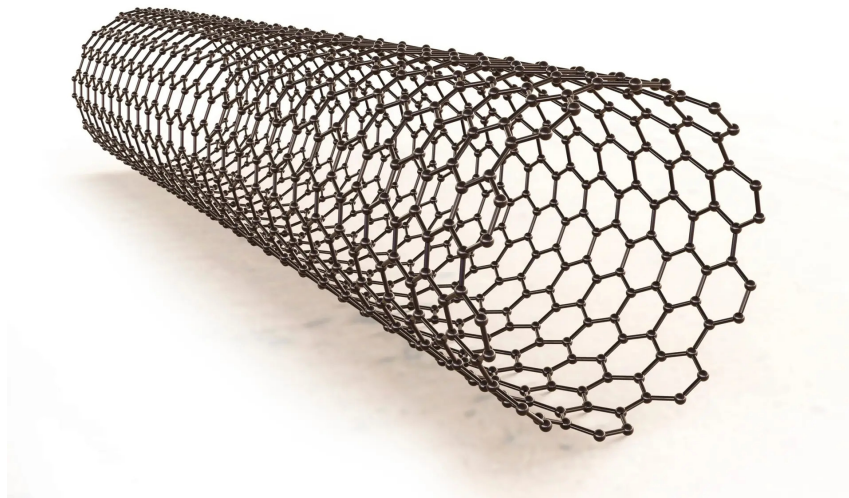
Figura 4.3: Negro de fumo.



Fonte: (Soluções Dynamic Air, 2023).

Nanotubos de Carbono, em inglês *Carbon Nanotubes* (CNTs), são materiais unidimensionais de escala nanométrica, dentre as muitas estruturas possíveis se ilustra uma delas na Figura 4.4. Os CNTs podem ser categorizados em duas classes de acordo com sua base cristalina: CNTs amorfos e CNTs cristalinos. Esses materiais têm excelente resistência mecânica, alta condutividade térmica e elétrica e boas capacidades de absorção de ondas eletromagnéticas. Dentre algumas características mais vantajosas dos compósitos poliméricos com materiais de escala nanométrica, destacam-se a não corrosividade e leveza como vantagens mais proeminentes. Polímeros preenchidos com CNTs tem propriedades mecânicas superiores de elasticidade e resistência à tensão em comparação aos compósitos à base de negro de fumo. Um benefício importante do uso de CNTs é que uma proporção muito menor desse material (0,35%) obtém condutividade semelhante à de um material com 20% de negro de fumo. Isso reduz significativamente o custo e o peso do MARE. CNTs são materiais não magnéticos; dessa forma sua dissipação de ondas eletromagnéticas ocorre por perdas ôhmicas, polarização e múltiplos espalhamentos devido a uma ampla área específica. CNTs com múltiplas paredes têm mais imperfeições em comparação aos de parede única; devido à sua maior permissividade e estrutura mais complicada, esses absorvem as ondas por relaxação dielétrica. Tais imperfeições prejudicam a atuação das perdas ôhmicas e os mecanismos de polarização do material compósito (AHMAD et al., 2019).

Figura 4.4: *Carbon Nano Tube*



(BEILSTEIN, 2025).

4.3.2 MARE a base de Grafeno

O grafeno é altamente adequado para aplicações de absorção eletromagnética devido à sua baixa densidade, boas propriedades mecânicas e dielétricas, e grande área de superfície. No entanto, os parâmetros eletromagnéticos e condutivos do grafeno puro não são adequados para atender à demanda de casamento de impedância. Por essa razão, o grafeno puro causa baixa absorção e forte reflexão. Uma vez que a eficiência de um MARE eletromagnética depende principalmente das características eletromagnéticas (incluindo permeabilidade e permissividade complexas), para obter uma MARE baseada em grafeno de camada fina, as características eletromagnéticas do composto devem ser controladas (AHMAD et al., 2019).

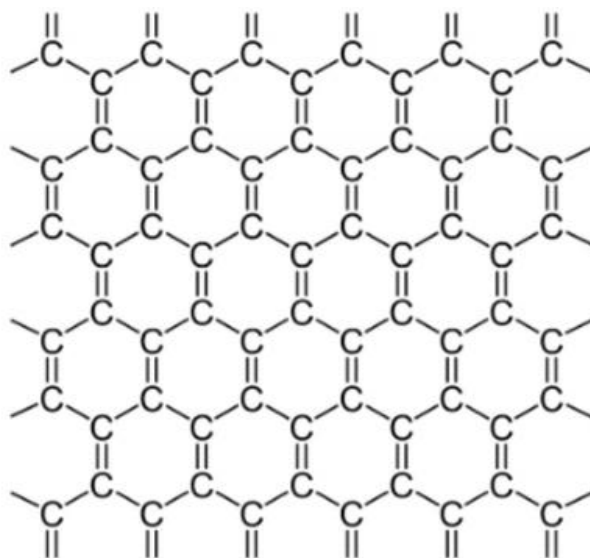
Sua estrutura molecular é apresentada na Figura 4.5, porque dependendo do modelo visual pode ser confundido com CNTs.

As propriedades de absorção eletromagnética dos compósitos preenchidos com grafeno dependem principalmente da perda dielétrica (permissividade), que pode ser otimizada variando o teor de grafeno. No entanto, os compósitos preenchidos com grafeno puro não conseguem atender às exigências de uma MARE ideal devido à sua baixa capacidade de casamento de impedância. Portanto, para melhorar as características de absorção de forma eficaz, materiais magnéticos são adicionados aos compósitos à base de grafeno (AHMAD et al., 2019).

4.3.3 Metamateriais

São materiais com estrutura vetorial em uma escala menor que o comprimento de onda. Metamateriais apresentam propriedades eletromagnéticas inesperadas em relação aos materiais “comuns” de mesma composição. A metaestrutura incrementa a interferência eletromagnética e perda condutiva no material, além de melhorar as propriedades eletromagnéticas. Dessa forma, metamateriais podem ser incorporados em absorvedores eletromagnéticos. Um exemplo encontrado foi de plástico estireno-butadieno-acrilonitrílico

Figura 4.5: Estrutura molecular do Grafeno

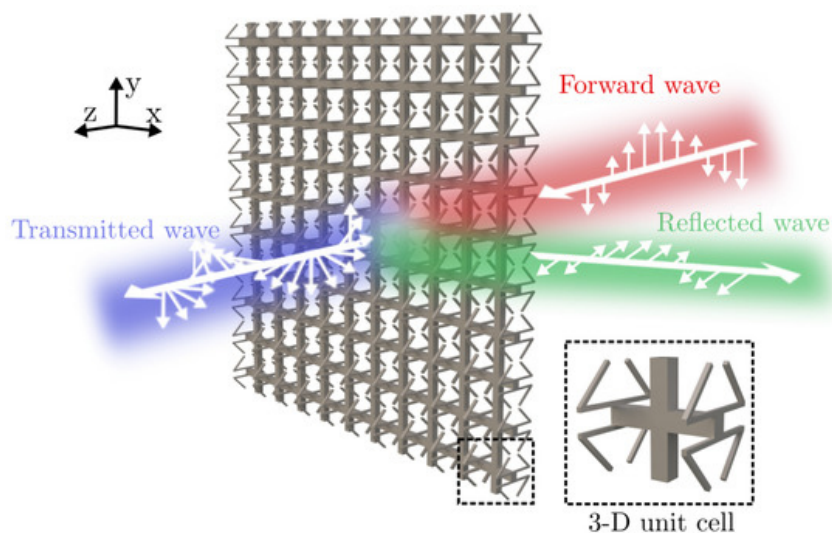


(Graphene-Info, 2025).

fabricado em uma estrutura giroidal em impressora 3D. A metaestrutura plástica foi então revestida com um material dielétrico à base de carbono. O metamaterial apresentou uma perda de reflexão de 10 dB ao longo de uma faixa significativamente larga (2 a 40GHz) (JIN et al., 2024).

A Figura 4.6 exemplifica uma estrutura de metamaterial que interage com o espectro eletromagnético, ressaltando que a atuação de um metamaterial se dá pela sua estrutura geométrica e composição química.

Figura 4.6: Exemplo de metamaterial interagindo com espectro eletromagnético



Fonte:(ALEX-AMOR; PALOMARES-CABALLERO; MOLERO, 2022).

4.4 Radares e assinaturas radar

A partir do conhecimento adquirido por Heinrich Hertz em 1886, que conseguiu observar experimentalmente a reflexão de ondas de rádio por superfícies metálicas tornou-se possível os primórdios dos radares, cujo princípio funcional sagrou-se com o emprego bem sucedido da *Chain Home* (codenome para o sistema radar britânico de alarme antecipado) durante a 2ª Guerra Mundial.

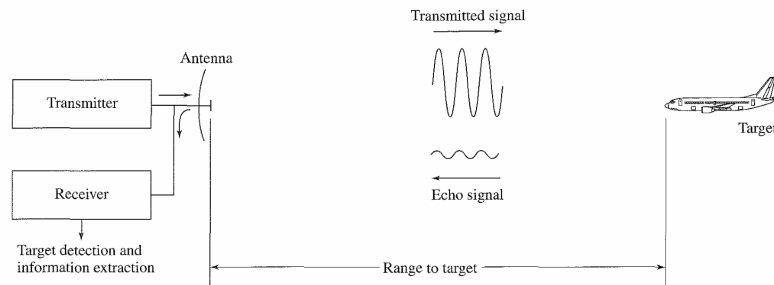
A vantagem que os sistemas radares conferiram foi decisiva e mudou os rumos daquela conflagração (SPANAGEL; BOUCHER-YIP, 2018).

Skolnik (2001) define o radar como um sistema de detecção e localização de objetos que refletem a densidade de potência, tais como aeronaves, navios, veículos, espaçonaves, pessoas e o meio ambiente. O próprio termo, é um acrônimo para *radio detection and ranging*. Em português é o equivalente a detecção e “distanciamento” (ou medida de distância) por rádio.

4.4.1 Princípios de funcionamento

Esse sistema opera irradiando densidade de potência no espaço e detectando o eco refletido pelo objeto ou alvo. Essa reflexão indica não tão somente a presença do alvo, mas também sua localização dentre outras informações relacionadas a ele, pelo processamento desse sinal que retorna ao radar.

Figura 4.7: Radar: funcionamento básico



Fonte: (SKOLNIK, 2001).

A Figura 4.7 ilustra o funcionamento desse sistema de forma muito simplificada. Sendo uma tecnologia em desenvolvimento desde a 2ª Guerra Mundial, existem atualmente diversos equipamentos, cada qual com seu projeto, cujas características influenciam na sua capacidade de detecção e na quantidade de informações obtidas do alvo pelo sistema. Na atualidade, os sistemas radares possuem muito mais funcionalidade e complexidade, imbuídos de *features* rebuscados e constituídos de eletrônica avançada. Genericamente, os sistemas radar, independentemente das especificidades de projeto, obedecem à chamada equação radar, que segundo (SKOLNIK, 2001), descreve-se pela equação 13.

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G A_e \sigma}{4\pi 2 S_{min}} \right]^{1/4} \quad (13)$$

Na qual P_t é a potência de transmissão; G o ganho da antena do radar; A_e a abertura

efetiva da antena; σ a seção reta radar do alvo; e S_{min} é a menor potência detectável pelo sistema.

Nesta equação, quase todos os parâmetros são dependentes do próprio radar, exceto por um. Esse parâmetro é a seção reta radar, que será brevemente explicada posteriormente.

Não somente o desenvolvimento tecnológico distingue os sistemas existentes, mas o seu uso. Muitos sistemas, especialmente os de uso comercial, ainda que excelentes no cumprimento do seu propósito, possuem capacidades excepcionais de detecção. Para os sistemas disponíveis ao público geral, sua funcionalidade se atém à integração com outros sistemas comerciais, em geral por exigências de segurança ou conveniência ao usuário. Exemplo imediato desse caso são os radares de navegação que se integram, dentre outros sistemas, ao GPS, conferindo-lhe uma informações relevantes à manobra da própria embarcação (velocidade no fundo; e as informações de latitude e longitude em tempo real são dois exemplos); e também integram ao AIS, cuja funcionalidade se orienta à segurança da navegação complementando as informações que o usuário do sistema pode obter de embarcações nas proximidades através da tela do radar. Em geral, radares de navegação são pulsados com varredura mecânica (a antena gira por meio de um motor elétrico) e poucos parâmetros podem ser alterados pelo operador para transmissão.

Conforme regulamentado pela UIT (União Internacional de Telecomunicações) são delimitadas bandas de frequência e designadas ao uso de sistemas radar em certa faixa. Na responsabilidade de denominá-las, a IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) atribuiu uma letra para cada banda, a partir da frequência dos Giga-Hertz. Assim, conforme ilustrado na Figura 4.8, pode-se observar o posicionamento da banda X, que mais interessa a este estudo.

Figura 4.8: Delimitações e denominações do espectro eletromagnético.

Padrão IEEE de nomenclatura de letras-banda para frequências radar

Designação de Banda	Faixa Nominal de Frequências	Faixas de Frequências Específicas para Radares baseado nas designações da UIT para a Região 2
HF	3–30 MHz	
VHF	30–300 MHz	138–144 MHz 216–225 MHz
UHF	300–1000 MHz	420–450 MHz 850–942 MHz
L	1–2 GHz	1215–1400 MHz
S	2–4 GHz	2300–2500 MHz 2700–3700 MHz
C	4–8 GHz	5250–5925 MHz
X	8–12 GHz	8500–10,680 MHz
K _u	12–18 GHz	13.4–14.0 GHz 15.7–17.7 GHz
K	18–27 GHz	24.05–24.25 GHz
K _a	27–40 GHz	33.4–36 GHz
V	40–75 GHz	59–64 GHz
W	75–110 GHz	76–81 GHz 92–100 GHz
mm	110–300 GHz	126–142 GHz 144–149 GHz 231–235 GHz 238–248 GHz

Fonte: (SKOLNIK, 2001).

Quando se trata de radares militares, visando facilitar a abordagem do tema dada sua vastidão e diversidade de sistemas e dispositivos distintos, pode-se observar da perspectiva que o sistema retorne ao operador dois resultados possíveis, muito genericamente. Primeiramente, o radar pode ser um sensor de vigilância que detecta múltiplos alvos em uma região do espaço Skolnik (2001), sendo capaz de até mesmo realizar algum acompanhamento, mas sem necessariamente ter excepcional precisão neste quesito. O outro produto desejável é o preciso, acurado e constante acompanhamento de um alvo específico. O radar que possua essa capacidade normalmente está associado a um sistema de armas.

Os radares de vigilância ou busca, genericamente, abrangem uma grande área no entorno do meio, cujo sistema se encontra embarcado. Seu principal objetivo é detectar a presença de alvos, que podem ser de superfície (fundamentalmente embarcações) ou aéreos (helicópteros e aviões, mais desejadamente os de caça, menores e mais rápidos). Esses radares podem ser dedicados a um único tipo de busca, exclusivamente de superfície ou aérea; ou podem realizar ambas simultaneamente, neste caso são chamados de busca combinada. Fica claro que o sistema necessita, sobretudo, ter sensibilidade suficiente para detectar o alvo com o maior alcance possível e resolução para ser capaz de distinguir com certa precisão, um alvo de outro. O acompanhamento para este caso é mais voltado à manutenção da consciência do meio perante a presença e comportamento do alvo.

Os radares cujo objetivo é obter um acompanhamento do alvo para, por exemplo, realizar disparos com armamento, costumam operar em frequências mais altas e empregar feixes mais estreitos. Esse sistema precisa de altas taxas de atualizações do alvo. O sinal deve ser forte e a resolução deve ser alta para que o sistema não o perca e não o confunda com outro alvo próximo.

Outra preocupação para os radares militares é a possibilidade de sofrerem interferência. Como solução para esse problema, existem diversas soluções, das quais duas são o CHIRP e a agilidade em frequência. O CHIRP é uma variação da frequência ao longo da transmissão do pulso, enquanto a agilidade de frequências consiste em trocar as frequências de transmissão entre diferentes pulsos transmitidos.

Diferentemente do caso comercial, nas plataformas militares, a exigência da consciência situacional vai muito além do grau básico de segurança. O uso militar exige mais precisão e maior quantidade de informações com atualizações mais rápidas, frequentes e acuradas, pois em um ambiente de conflito detectar ou não (ou mesmo perder o alvo já previamente detectado), significa um potencial risco à sobrevivência do meio.

Então, os parâmetros dos radares militarizados são mais flexíveis ao uso do operador; os sistemas são mais robustos e precisos; e o poder de processamento além da diversidade de modos de transmissão são muito maiores.

4.4.2 Assinatura radar

A compreensão do funcionamento do radar e de certas características é deveras importante para o estudo de um material absorvedor. Conforme já disposto, o radar depende da quantidade de densidade de potência que retorna para seu receptor. A intensidade desse eco radar está intimamente ligada ao quanto de densidade de potência da onda eletromagnética que interage com o alvo em questão, este consegue refletir. A essa quantidade de

densidade de potência é chamada de seção reta radar, ou RCS de *Radar Cross Section* (R. M. RICHTER, 2020). Skolnik (2001) calcula a RCS conforme a equação 14.

$$\sigma = \frac{\text{power reflected towards source/unit solid angle}}{\text{incident power density}/4\pi} = 4\pi R^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} \quad (14)$$

Onde R , E_r e E_i correspondem, respectivamente, à distância do radar ao alvo, à intensidade do campo elétrico refletido para a fonte e à intensidade do campo elétrico incidente. No interesse deste estudo vale ressaltar que a densidade de potência incidente, depende exclusivamente da capacidade do sistema transmissor (potência de transmissão e ganho da antena do radar) e da distância entre eles. Já o quanto o alvo pode refletir, está intrinsecamente ligado às disposições da primeira seção deste documento.

Quanto menor a quantidade de densidade de potência refletida, menor a RCS, ou nos mesmos termos, mais diminuta será a assinatura radar. Dos mais rústicos aos mais sofisticados sistemas, existe um requisito básico a ser atendido para que haja detecção: a intensidade do eco que chega ao receptor do radar deve ser superior ao limiar de detecção do sistema. Se um alvo não refletir densidade de potência suficiente poderá não ser detectado.

4.4.3 Tecnologia *Stealth* e a redução da RCS

Uma das formas de reduzir a RCS é por meio da geometria do meio, de forma que a densidade de potência refletida não retorne ao receptor do radar. Esta estratégia, por si só, não tenta reduzir a intensidade do eco pela interação eletromagnética do material que constitui ou reveste o meio com a densidade de potência incidente, mas fazendo com que essa densidade de potência seja reirradiada para múltiplas direções que não sejam a do radar transmissor. Assim, a densidade de potência que de fato retorna à fonte é atenuada, mas pelo efeito de dispersão ocorrida no instante da reflexão. Notadamente, essa técnica foi empregada no *design* de aeronaves *stealth* como o F-22 "*Raptor*" e F-35 "*Lightning II*". Para comparar uma aeronave com a outra, basta observar as Figuras 4.9 e 4.10.

Figura 4.9: F-35 "*Lightning II*".



(BRIGANTI, 2020).

Podem-se perceber os ângulos distintos ao convencional que o F-35 possui em seu

desenho, tornando sua silhueta bem característica, cujo propósito, como mencionado, intenciona evitar a reirradiação eletromagnética de volta para a fonte.

Figura 4.10: F-22 "Raptor".



(Defense Visual Information Distribution Service (DVIDS), 2021).

Tendo sido desenvolvido primeiro, notadamente, o F-22 ostenta em sua silhueta o *design* base para o desenvolvimento do projeto do F-35. Um ponto positivo para esse método é que não depende da frequência, da varredura ou da forma de onda transmitida, seja esta com ou sem modulação intrapulso ou interpulso. A dispersão ocorre da mesma forma.

Por outro lado, implica grandes desafios de *design* e limitações do nível de atenuação pelo mesmo princípio que garante a atenuação, a geometria. Tomando o exemplo do próprio F-22, certamente a sua reflexão será menor se a onda incidir na aeronave de perfil do que se o isso ocorrer no seu dorso ou sua barriga perpendicularmente. Assim, a atenuação não é sempre ótima em função das variações do ângulo de incidência.

Por exemplo, na Figura 4.11 há um F-35 em vôo com o compartimento de armas aberto, isso gera uma irregularidade na silhueta que pode aumentar a reflexão. Se considerar a situação ilustrada, em que a aeronave esteja aproada como o radar que a deseja detectar, fica projetada uma superfície plana. Certamente, a probabilidade dessa aeronave ser detectada se elevou consideravelmente.

Figura 4.11: F-35 "Lightning II" visto de frente.



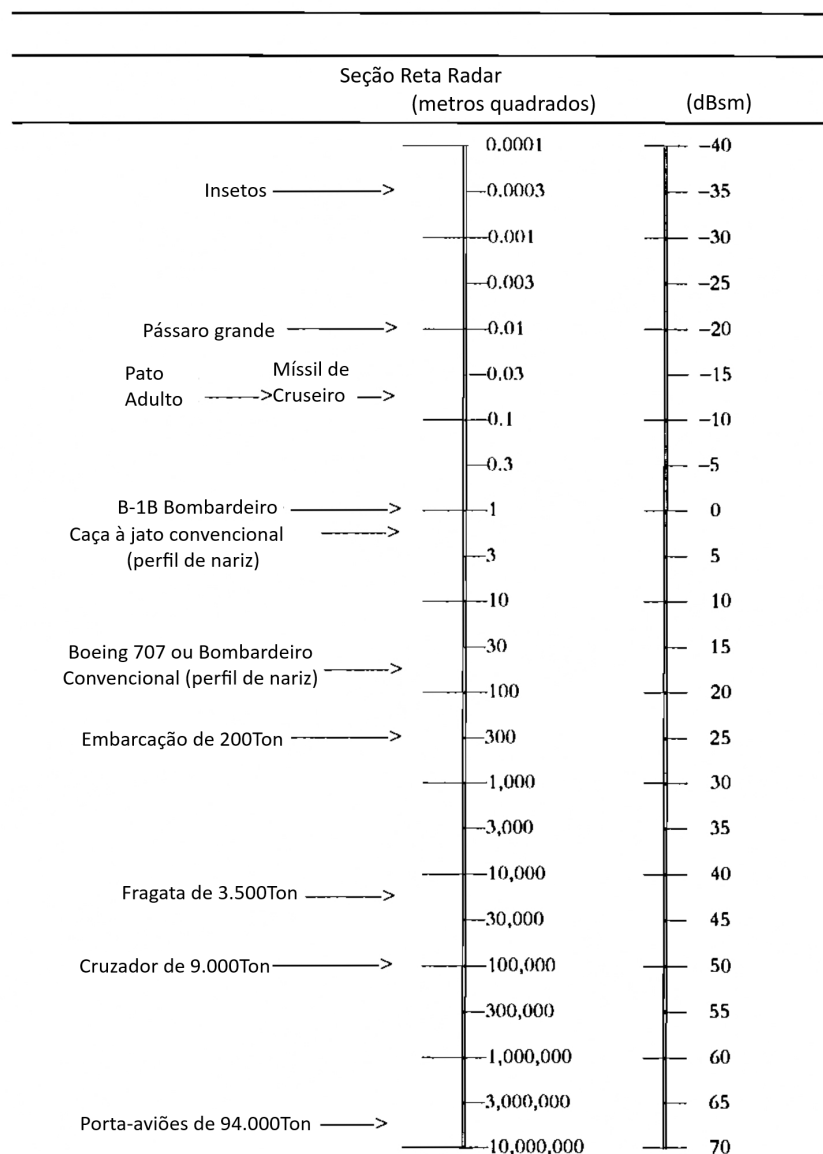
(Força Aérea, 2025).

Fazendo um paralelo a essa limitação da geometria em navios, equivale ao balanço e

caturro que ocorrem por conta das ondulações do mar e jogo natural do meio. Ocasionalmente os ângulos que pretendem dispersar a densidade de potência podem direcionar de volta para a fonte emissora.

Outra limitação para essa estratégia que imediatamente se apresenta é o tamanho do meio; certamente não para o caso de aeronaves, mas fazer de uma fragata ou mesmo uma corveta um meio furtivo apenas com a dispersão pode não ser tão eficiente. Para se conseguir o máximo de atenuação possível, não se deve limitar ao uso de uma única técnica. Ainda valendo-se do exemplo daquelas aeronaves, não somente sua geometria, mas o seu revestimento é constituído de um material absorvedor de forma a se manterem consistentemente furtivas aos sensores radar.

Figura 4.12: Tabela de RCSs.



Fonte: Adaptado de (MCGILLVRAYJR, 1994).

Neste ponto, torna-se interessante ressaltar um divisor de águas na aplicação das tecnologias empregadas em meios *stealth* aéreos e navais. Enquanto a filosofia que orienta o desenvolvimento no setor aeronáutico é tornar o meio “invisível”, para embarcações

não recomendado seguir essa metodologia, haja à vista o grande porte que a maioria dos meios navais possuem.

Para efeito comparativo mais concreto, tome-se a tabela apresentada por McGillvray Jr (1994) ilustrada na Figura 4.12, na qual são observadas as diferentes RCS associadas ao respectivo objeto refletor.

Claramente, mesmo os menores navios com 200 toneladas de deslocamento, cujo porte é relacionável ao de um Navio-Patrolha de 4ª classe na Marinha do Brasil, possuem três vezes maior RCS (neste caso de 300 m²) em comparação com um grande avião comercial (utilizado como exemplo um Boeing 707), cujo tamanho se compara ao de um bombardeiro. Dessa forma, justifica-se o intento da indústria aeronáutica em camuflar completamente o meio, bem como se compreende seu sucesso, visto que a RCS de um F-22 é semelhante à de um pássaro, estimada em 0,01 m².

Já não se apresentando como uma meta factível para um navio menor, certamente seria disfuncional buscar esse mesmo objetivo em um navio de escolta como, fragatas e corvetas. McGillvray Jr (1994) ainda apresenta em seu estudo o exemplo da implementação das tecnologias *stealth* em uma fragata, cuja RCS convencional é estimada em 25.000 m². Na Figura 4.13, são descritas as condições dos testes, durante os quais empregou-se o uso de materiais absorvedores de diferentes qualidades; por fim combinando *desing* interferidor e MARE conseguiu reduzir a assinatura radar desse mesmo meio para apenas 600 m². Ressalta-se que apenas pelo uso de MARE de baixa qualidade a RCS caiu para metade do valor original.

4.4.4 Aplicabilidade operativa

A utilidade operativa desse material em meios de superfície remete ao termo *stealth*, ou camuflagem, e está principalmente ligada a sobrevivibilidade do meio. Seu principal propósito para os navios, mais categoricamente, é reduzir a observabilidade do meio.

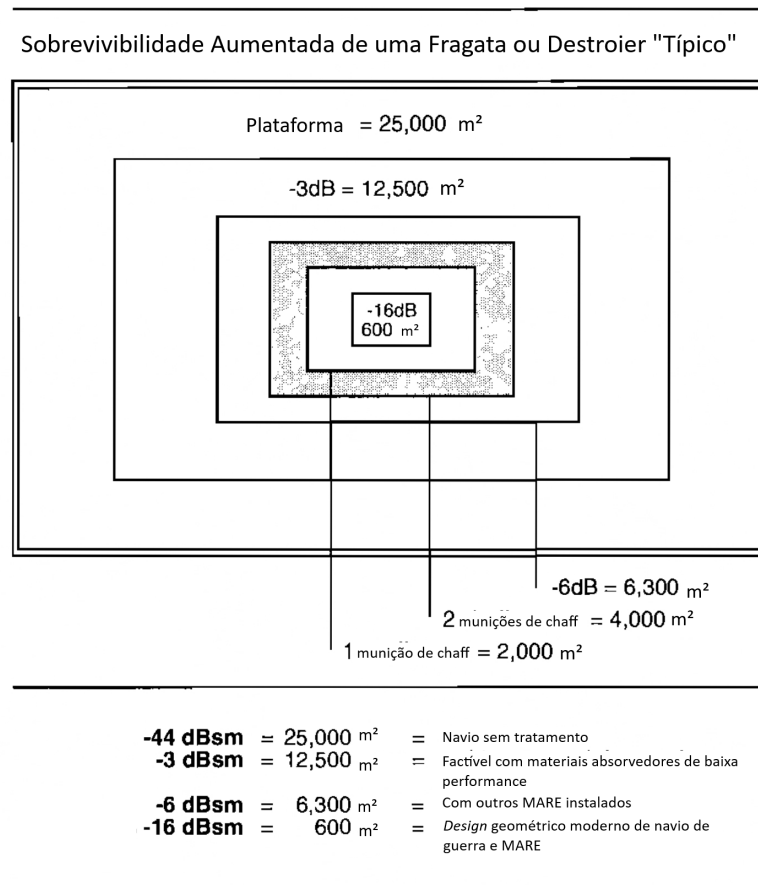
Um meio de baixa observabilidade não é um termo tão atual, McGillvray Jr (1994) define observabilidade como todas as formas que o meio poderia ser percebido, isso inclui, portanto todas as suas formas de assinatura. Sejam as quais:

- Acústica - consequência do ruído radiado pelo casco, que seja produzido pelo maquinário;
- Eletrônica - gerada pelas emissões ativas dos equipamentos eletrônicos, como radares, sistemas de comunicação ou de posição, por exemplo. Para eliminar essa assinatura, é necessário desligar os equipamentos, entretanto isso implicaria perder a capacidade de detecção e de navegação radar, enquanto para as comunicações seria possível apenas receber mensagens.
- Visual - existe pelo mero fato do meio estar visível durante o período diurno. A esteira de um navio é surpreendentemente detectável pelo ar e pelo espaço, além de possuir surpreendente longa duração. Pouco pode ser feito, até então, neste caso além de tintas que diminuam o contraste do meio com o ambiente, reduzindo por consequência a detectabilidade por sistemas eletro-ópticos.
- Infravermelha (IR) - é causada pela irradiação térmica no espectro eletromagnético, especialmente no infravermelho médio (*Middle Infrared* - MIR). Essa é a faixa que

fontes de calor comumente emitem, como chaminés, que ainda que representem uma pequena parcela da área total de um navio, são responsáveis por quase toda emissão de MIR.

- Seção reta radar - já explicada anteriormente, não será repetida a definição. Ressalte-se apenas que é o principal parâmetro utilizado por mísseis com sistema de busca ativa na faixa de microondas.

Figura 4.13: Comparativo de RCSs da Fragata com e sem técnicas *stealth*.



Fonte: Adaptado de (MCGILLVRAYJR, 1994).

Ainda que proeminentemente se pense nas maiores embarcações como navios-aeródromos, grandes transportadores de tropas e carros de combate além dos navios-escolta, não se deve restringir apenas a isso.

O termo-chave que orienta o escopo deste estudo, “plataformas de superfície” também pode incluir avisos, lanchas e outras embarcações menores, até mesmo drones de superfície, estes que têm sido objeto de desenvolvimento recente, podem também se beneficiar do uso de MARE.

Numa singela suposição, para lanchas e drones menores, pode ser muito viável se tornarem menos detectáveis pelos radares, assim como as aeronaves. Entretanto, a utilidade, neste caso, tenderia a ser não tanto defensiva, mas potencialmente ofensiva. Pode-se uma possibilidade latente de utilizar um drone de superfície com armamento de alta letalidade a despeito de seu tamanho, inspirando-se ao emprego de lanchas de ataque rápido. Sendo

projetado para ser furtivo, seria difícil de detectar sua aproximação atribuindo, portanto, grande fator surpresa.

McGillvray Jr (1994) deixa claro que a tecnologia furtiva para navios de guerra visa, principalmente, reduzir sua refletividade ao ponto de que aos sensores radar se apresentem menores que de despistadores, como nuvens de *chaff* que têm 2.000 m² de RCS. Também colabora à sobrevivência do meio ao aumentar indiretamente a eficácia de interferidores. Aponta-se mais essa vantagem do uso de MARE, porque muitos mísseis antinavio possuem guiagem por radar e reduzir a RCS, conseqüentemente, reduz a distância de *burn-through* (distância em que a interferência produzida por um ataque eletrônico não surte efeito, pois o eco do sistema emissor sobrepuja a interferência).

Figura 4.14: Dispersão de chaff (nuvem de fibras de carbono) para proteção naval.



(Philippine Defense Resource, 2021)

Na Figura 4.14 se ilustra o emprego de cortinas de *chaff* por um meio de superfície. O *chaff* é um dos tipos de despistadores, cujo propósito é seduzir os sensores ativos de mísseis para longe do alvo real.

Há, contudo, uma questão que deve ser levada em consideração ao empregar MARE em um meio naval. Sua aplicação nas superfícies acrescenta peso acima do centro de gravidade, prejudicando a estabilidade e navegabilidade. Como já relatado, para que um MARE seja eficaz deve possuir certa espessura, se o absorvedor for uma tinta não seria uma ou duas demãos suficientes para atingir o requisito necessário de absorção. Portanto, torna-se necessária grandes quantidades de material, e grandes quantidades tendem a pesar, especialmente ao se considerar que toda a superestrutura, ou pelo menos a maior parte dela, deverá estar coberta pelo material.

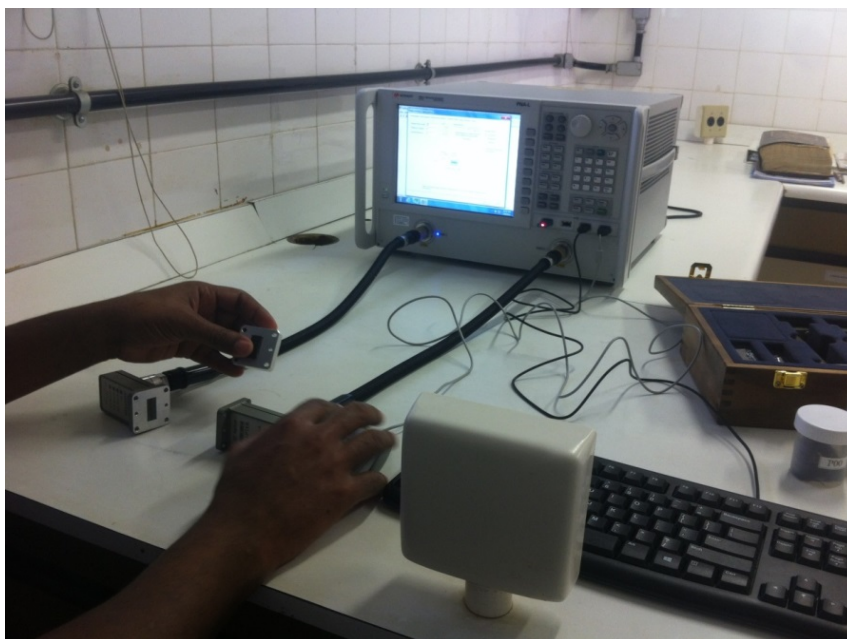
5 Caracterização eletromagnética de compósito parafínico dielétrico

O material absorvedor analisado neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) consiste em um compósito formado por um Negro de Fumo condutor (NF) disperso em uma matriz parafínica. Este compósito foi desenvolvido a partir de pesquisas conduzidas pela Divisão de Materiais Avançados do Grupo de Tecnologia de Materiais e Química do Instituto de Pesquisas da Marinha.

Para a caracterização, foram realizadas medições utilizando guias de onda, com base em dados de espalhamento adquiridos por um analisador de rede vetorial. As propriedades eletromagnéticas do material, como permeabilidade magnética e permissividade dielétrica, foram determinadas utilizando o algoritmo de Nicolson-Ross, que relaciona os parâmetros de espalhamento medidos com essas propriedades intrínsecas do material.

O equipamento empregado para a caracterização foi o Analisador Vetorial de Rede Keysight N5232A (faixa de operação de 300 kHz a 20 GHz, modelo PNA-L), representado na Figura 5.1. Este dispositivo possibilita a análise da absorção das ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas. Para isso, foram utilizados corpos de prova configurados em guias de onda retangulares, com medições de permeabilidade e permissividade complexas.

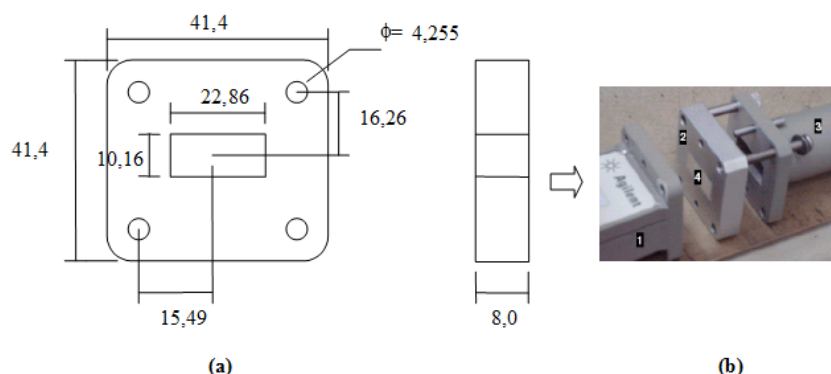
Figura 5.1: Analisador Vetorial de Rede (N5232A 300kHz to 20 GHz PNA-L network analyser) da Keysight



Fonte: Obtida do diretório de fotos do IPqM.

Dependendo da faixa de frequência, o guia de ondas e, conseqüentemente, o porta-amostra utilizado deve possuir uma determinada dimensão. O porta-amostra pertinente a faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz (banda X) é mostrado na Figura 5.2.

Figura 5.2: Porta amostra. (a) Dimensões do porta amostra em milímetros, (b) Foto do porta amostra com corpo de prova sendo: 1 – acoplador da porta 1; 2 – porta amostra; 3 – trecho de guia de ondas da porta 2 e 4 – corpo de prova.



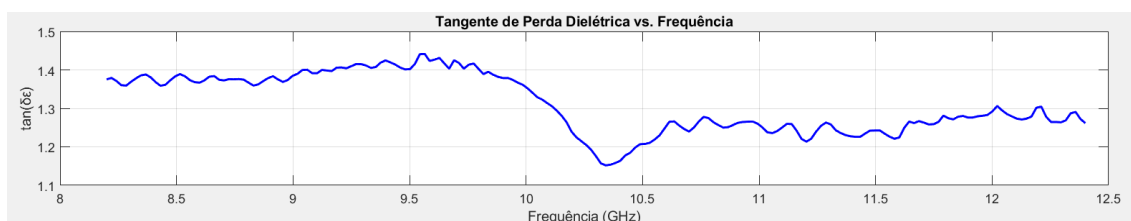
Fonte: Engenharia Metalúrgicas e de Materiais da UFRJ (2007).

5.1 Propriedades eletromagnéticas do compósito

5.1.1 Permissividade complexa na banda X

O compósito de NF: parafina (30:70, % em peso) foi avaliado quanto à propriedade elétrica de permissividade na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz (banda X). Com os valores de permissividade real e imaginária, os valores de tangente de perda dielétrica foram obtidos, por intermédio da equação 9 como aponta a Figura 5.3.

Figura 5.3: Tangente de perda dielétrica na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz.



Fonte: Obtida do diretório de fotos do IPqM.

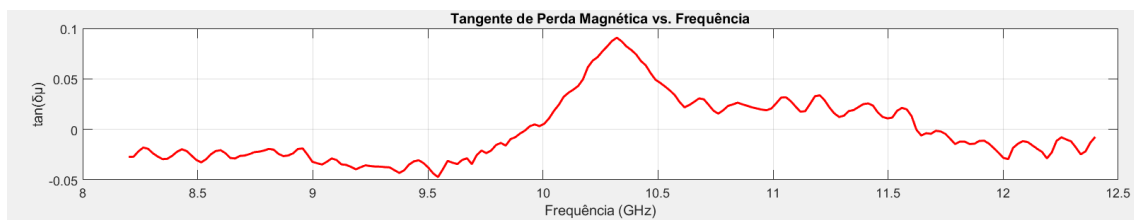
A parte real da permissividade complexa, também chamada de constante dielétrica, está relacionada com o armazenamento de densidade de potência elétrica e a parte imaginária com a sua dissipação. Os valores de ϵ'' são excepcionalmente altos, superando os valores de ϵ' em toda a faixa de frequência. Isso é um forte indicador de perdas dielétricas massivas, onde a densidade de potência elétrica é convertida em calor.

5.1.2 Permeabilidade complexa na Banda X

Os valores de permeabilidade complexa do compósito parafínico NF: parafina (30:70, % em peso) também foram avaliados. De forma análoga à permissividade complexa, a parte real da permeabilidade complexa, está relacionada com o armazenamento de densidade de potência magnética e sua parte imaginária com a dissipação desta densidade de

potência. Os valores de tangente de perda magnética foram obtidos, por intermédio da equação 4 como é mostrado na Figura 5.4.

Figura 5.4: Tangente de perda magnética na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz.



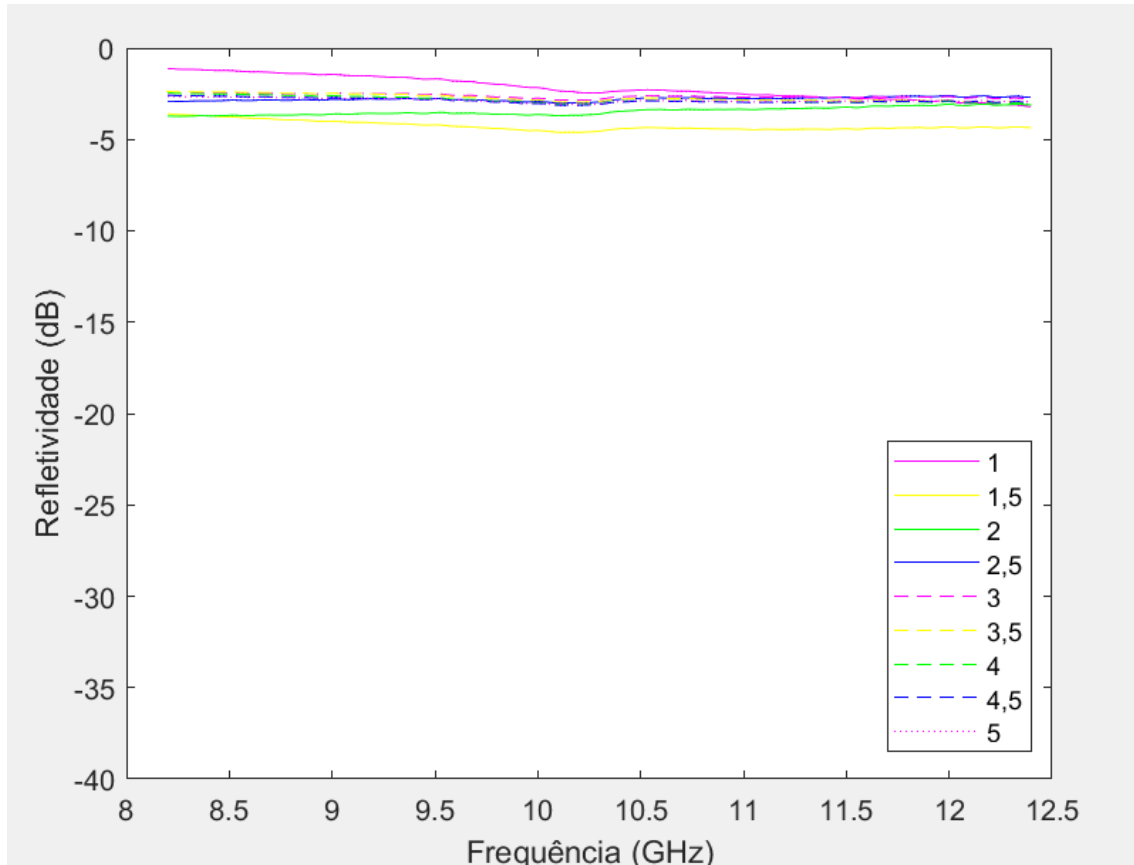
Fonte: Obtida do diretório de fotos do IPqM.

No gráfico, observa-se que não há uma contribuição expressiva da componente magnética devido aos baixos valores da tangente de perda magnética do compósito na faixa de frequência estudada.

5.1.3 Medida de refletividade do compósito

A Figura 5.5 mostra o resultado da análise de refletividade do compósito parafínico para diferentes espessuras.

Figura 5.5: Curvas de Refletividade do compósito parafínico OD: parafina (30:70, % em peso) obtidas na banda X com diferentes espessuras.



Fonte: Obtida do diretório de fotos do IPqM.

Por intermédio da Figura 5.5, observa-se que o compósito de espessura de 1,5mm, apresenta valores de refletividade mais baixos apontando para uma maior absorção da onda eletromagnética incidente. O compósito parafínico com negro de fumo (30:70, % em peso) é um material que exibe boas capacidades intrínsecas de dissipação de densidade de potência eletromagnética na banda X, predominantemente através de mecanismos dielétricos ($\tan \delta\epsilon$ na faixa de 1.16 a 1.41). No entanto, apesar destas notáveis propriedades dissipativas, o desempenho global de absorção do material, evidenciado por uma refletividade de apenas aproximadamente -3,5 dB para uma espessura de 1,5 mm em toda a faixa de frequência, é insuficiente para que o compósito seja considerado um bom atenuador da radiação eletromagnética e possa ser utilizado para a redução da seção reta radar em plataformas navais. A análise aponta claramente que a principal limitação deste compósito não é sua capacidade de dissipar densidade de potência internamente, mas sim sua baixa capacidade de permitir que a densidade de potência penetre na sua estrutura devido a um severo descasamento de impedância na interface ar/material. A alta permissividade complexa, particularmente sua componente imaginária (ϵ''), provavelmente resulta em uma impedância de entrada do material que é significativamente inferior à impedância do espaço livre, agindo como uma barreira de reflexão para a onda incidente.

5.1.4 Análise comparativa do material produzido

Obtidos os resultados experimentais, segue uma análise comparativa de desempenho entre o material produzido para este estudo e demais compósitos com negro de fumo encontrados na literatura, que já foram apresentado anteriormente neste documento.

Para isso será realizada uma conversão da apresentação dos valores, porque os demais estudos apresentaram como parâmetro a atenuação, enquanto este estudo apresentou a refletividade. Embora ambas se meçam em dB, não traduzem a mesma informação. Dessa forma será comparada quanto de porcentagem da densidade de potência incidente cada material absorve, para atingir esse objetivo segue a conversão da refletividade em valores absolutos a partir da equação 15, obtendo o valor de densidade de potência refletida na equação 16. Obtendo assim o valor aproximado de 55,33% de densidade de potência absorvida pela equação 17.

$$|\Gamma^2| = 10^{\frac{Refletividade(dB)}{10}} \quad (15)$$

Cálculo da densidade de potência refletida em valores absolutos

$$|\Gamma^2| = 10^{\frac{-3,5}{10}} = 0,4467 \quad (16)$$

Assim, a densidade de potência absorvida se calcula

$$Absorção = 1 - |\Gamma^2| = 1 - 0,4467 \quad (17)$$

$$Absorção = 0,5533 \quad (5.1)$$

$$Absorção(\%) = Absoro \times 100 = 55,33\% \quad (5.2)$$

Listando os compósitos para comparação, retirados da seção de Materiais Absorvedores

- Negro de fumo em nanocompósito (30:70) - 40 dB de atenuação;
- Negro de fumo em compósito de fibra de vidro e epóxi (6:94) - 32dB de atenuação; e
- Negro de fumo em compósito de borracha e silicone - 24dB de atenuação.

Convertendo os valores em decibéis para valores absolutos e então para porcentagem nas equações 20, 21 e 22. Cálculos baseados na fórmula da equação 19, seja essa uma reformulação conveniente da equação 18.

$$L_{dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{incidente}}{P_{refletida}} \right) \quad (18)$$

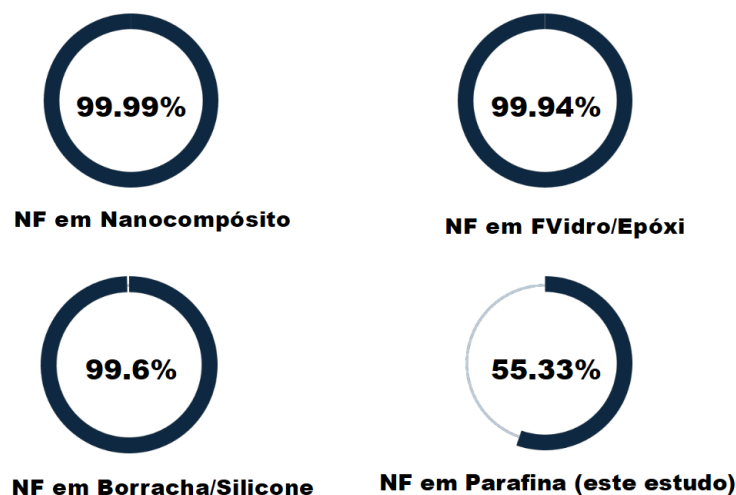
$$\left(\frac{P_{refletida}}{P_{incidente}} \right) = 10^{-\frac{L_{db}}{10}} \quad (19)$$

Assim ficam dispostos os respectivos desempenhos de absorção para comparativo:

- Negro de fumo em parafina (30:70) - 55,53%;
- Negro de fumo em nanocompósito (30:70) - 99,99%;
- Negro de fumo em compósito de fibra de vidro e epóxi (6:94) - 99,94%; e
- Negro de fumo em compósito de borracha e silicone - 99,6%.

Diante do exposto, há, de fato, uma diferença considerável de desempenho em absorção para com os demais compósitos na ordem de 40% menor desempenho, como melhor visualizável na Figura 5.6.

Figura 5.6: Gráfico comparativo.



Fonte: Produção do autor.

Entretanto vale pontuar algumas ressalvas pertinentes ao comparativo e sua análise.

Primeiramente, há pouca informação aberta a respeito do desenvolvimento desses materiais, no observar se de fato a comparação é equânime.

Outro fator importante é que, pelo menos no caso do nanocompósito, vale observar um grau de complexidade e custo muito mais elevado de desenvolvimento que o material apresentado neste estudo.

Por fim, é importante entender também que, ainda assim, considerar que metade da densidade de potência sendo absorvida significa que a intensidade da densidade de potência que retorna ao sensor também será metade do valor, em relação ao que ocorreria sem a absorção.

6 Conclusões

Diante das considerações feitas, os MARE conferem a um meio naval uma grande vantagem, especialmente no tocante à sua sobrevivibilidade nos teatros de operações. Os constantes avanços nas tecnologias de detecção ressaltam que garantir o menor grau de observabilidade dos meios pode ser decisivo.

Sendo assim, o desenvolvimento de MARE se apresenta como uma necessidade iminente. Este estudo marcou mais um passo na direção desse intento.

Ainda que o compósito parafínico a base de negro de fumo produzido para este estudo, não tenha apresentado desempenho insuficiente para aplicação direta nos meios, é possível encontrar soluções para contornar as dificuldades encontradas.

O descasamento de impedâncias é um problema conhecido na literatura e existem soluções elaboradas para o mesmo. Conforme discorrido na seção de Materiais Absorvedores, poderia-se tentar produzir um compósito multicamada; um material híbrido; ou mesmo a fabricação de um metamaterial com o negro de fumo. Todavia, seria necessário mais tempo para estudar quais das soluções seriam mais adequadas e, então, realizar os testes de acordo para se obter resultados mais conclusivos sobre o uso do negro de fumo como MARE.

Conclui-se que em face ao bom potencial de dissipação de densidade de potência que o negro de fumo, com rendimento superior ou semelhante a de estruturas mais complexas, deve ser estudado mais aprofundadamente seguindo desenvolvimento a partir dos conhecimentos adquiridos. Sugere-se que para o prosseguimento desta linha de pesquisa, diante das opções já listadas, que seja dada preferência para um compósito multicamada por ser de mais fácil desenvolvimento e confecção em relação às outras possibilidades.

REFERÊNCIAS

AHMAD, H. et al. *Stealth technology: Methods and composite materials—A review*. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc., 2019. 4457-4472 p.

ALEX-AMOR, A.; PALOMARES-CABALLERO, ; MOLERO, C. 3-d metamaterials: Trends on applied designs, computational methods and fabrication techniques. *Electronics*, MDPI, v. 11, n. 3, p. 410, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/11/3/410>>.

ARONSTEIN, D. C. *Advanced Tactical Fighter to F-22 Raptor: origins of the 21st century air dominance fighter*. 1801 Alexander Bell Drive - Reston, VA - USA: American Institute Of Aeronautics, Inc, 1998. 21-34 p.

BEILSTEIN, N. *Researchers Reveal Breakthrough in Carbon Nanotube Recycling*. 2025. Disponível em: <<https://www.thomasnet.com/insights/carbon-nanotube-recycling-study/>>.

BRIGANTI, G. d. *Pentágono favorece F-35 em vez de F/A-18E/F em ofertas para a Suíça*. 2020. Disponível em: <https://www.aereo.jor.br/2020/10/02/pentagono-favorece-f-35-em-vez-de-f-a-18e-f-em-ofertas-para-a-suica/#googl_rewarded>.

Defense Visual Information Distribution Service (DVIDS). *Imagem: Lançamento de contramedidas por C-130 Hercules*. 2021. Disponível em: <<https://media.defense.gov/2021/Sep/17/2002856354/2000/2000/0/210911-Z-DY403-9158.JPG>>.

ENRIQUE, P. et al. *UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA FILMES FINOS METÁLICOS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA APLICADOS À TECNOLOGIA FURTIVA*. [S.l.], 2014.

Força Aérea. *Imagem: F-35A RNLAf*. 2025. Disponível em: <<https://i1.wp.com/forcaarea.com.br/wp-content/uploads/2025/01/F-35A-RNLAf.jpeg?ssl=1>>.

Graphene-Info. *What is Graphene?* 2025. Disponível em: <<https://www.graphene-info.com/graphene-structure-and-shape>>.

JIN, Y. et al. *Recent Progress in Electromagnetic Wave Absorption Coatings: From Design Principles to Applications*. [S.l.]: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024.

MCGILLVRAYJR, J. W. *Stealth Technology in Surface Warships*. [S.l.], 1994. v. 47, 28-39 p. Disponível em: <<https://digital-commons.usnwc.edu/nwc-review/vol47/iss1/4>>.

Philippine Defense Resource. *Frigate Lot 3B - Chaffs Acquisition Project of the Philippine Navy*. 2021. Disponível em: <<https://www.phdefresource.com/2021/04/frigate-lot-3b-chaffs-acquisition.html>>.

RICHTER, C.-A. R. M. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EQUIPAGENS DA AVIAÇÃO DE PATRULHA PRÊMIO BRIGADEIRO MAGALHÃES MOTTA 2020 CAPACIDADE DE SOBREVIVÊNCIA EM COMBATE DA AERONAVE P-3AM BASEADA EM SUA ANÁLISE DE RCS PARA FREQUÊNCIAS DE RF. [S.l.], 2020.

SKOLNIK, M. I. *Introduction to radar systems*. 3ª. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2001. 772 p. ISBN 007118189X.

Soluções Dynamic Air. *Negro de Fumo: manuseio de forma confiável*. 2023. Disponível em: <<https://www.solucoesdynamicair.com.br/blog/negro-de-fumo-manuseio-de-forma-confiavel>>.

SOYZA, W. H. N. D.; YOUSIF, A.; LIU, J. Polymer composite materials for electromagnetic waves absorption. *International Journal of Engineering Works*, v. 11, p. 61–104, 2024. ISSN 2409-2770. Disponível em: <<https://doi.org/10.34259/ijew.24.110461104>>.

SPANAGEL, D.; BOUCHER-YIP, E. Ww2 tech e2018.boucher.soultanian_{ram.inquiryseminar}.Aram Soultanian, 62018.

WARREN, T. *F-117 Stealth Fighter Units of Operation Desert Storm*. Midland House, West Way, Botley, Oxford, OX2 0PH 443 Park Avenue South, New York, NY, USA: Osprey Publishing, 2007. 1-66 p.

ZHAO, Q. et al. Review on the electrical resistance/conductivity of carbon fiber reinforced polymer. *Applied Sciences*, MDPI, v. 9, n. 12, p. 2390, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/12/2390>>.