

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

**RADOMES PARA SUBMARINO: Materiais, Tecnologias e Aplicações para a Marinha do
Brasil**



PRIMEIRO-TENENTE GUILHERME VILLAÇA MARTINS RIBEIRO

Rio de Janeiro
2025

PRIMEIRO-TENENTE GUILHERME VILLAÇA MARTINS RIBEIRO

RADOMES PARA SUBMARINO: Materiais, Tecnologias e Aplicações para a Marinha do
Brasil

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

RADOMES PARA SUBMARINO: Materiais, Tecnologias e Aplicações para a
Marinha do Brasil

Primeiro-Tenente Guilherme Villaça Martins Ribeiro

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

Aprovado por:

Dr. Roberto da Costa Lima, IPqM

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

Dr. Carlos Vinicio Rodriguez Ron, PUC-Rio

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2025

Ribeiro, Guilherme Villaça Martins.

RADOMES PARA SUBMARINO: Materiais, Tecnologias e Aplicações para a Marinha do Brasil. – Rio de Janeiro: MB/CIAA, 2025.

xiii, 40 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. 39–40.

1. Radome 1. 2. Submarino 2. 3. Compósitos 3.4. Simulação Estrutural 4. 5. Transparência Eletromagnética 5. I. Lima, Roberto da Costa. II. Marinha do Brasil, CIAA, Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica. III. Título.

*Dedico este trabalho à minha amada esposa, pelo seu
incansável apoio e dedicação à nossa família,
permitindo-me, nos momentos de maior dificuldade,
encontrar forças para seguir adiante.*

"A persistência é o caminho do êxito."

— Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por sempre buscar o meu engrandecimento espiritual e por me trazer para perto de Si em todos os momentos, especialmente nas dificuldades. Foi através da fé e da confiança em Seus propósitos que encontrei força e serenidade para enfrentar os desafios deste percurso, mantendo-me firme diante das adversidades e grato pelas bênçãos recebidas.

O ano em que este trabalho foi desenvolvido foi marcado por intensos desafios e aprendizados. Como 1º Tenente da Marinha do Brasil, cursando a pós-graduação em Guerra Eletrônica, enfrentei um período de grande dedicação e esforço, tanto profissional quanto pessoal.

Agradeço profundamente à minha esposa, Gabriela Villaça, e à nossa filha, Júlia Villaça, de apenas onze meses, por todo amor, paciência e compreensão ao longo desta jornada. Minha esposa, natural de Manaus, mudou-se para o Rio de Janeiro para que eu pudesse realizar este curso, abrindo mão de sua rotina e enfrentando comigo os desafios dessa nova etapa. Passamos por momentos de provação, especialmente quando nossa filha adoeceu diversas vezes, exigindo nossa atenção e resiliência. Mesmo diante das dificuldades, Gabriela manteve-se firme e me apoiou incondicionalmente, tornando possível a conclusão deste trabalho.

Estendo meus sinceros agradecimentos às nossas famílias e amigos, que, com palavras de incentivo e gestos de solidariedade, nos ofereceram suporte emocional e prático, permitindo que mantivéssemos a alegria e a esperança mesmo nos momentos mais exaustivos.

Aos meus orientadores, manifesto minha profunda gratidão pela orientação, paciência e incentivo constantes. Suas observações, críticas construtivas e direcionamentos foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para o meu crescimento acadêmico.

De forma especial, agradeço ao Dr. Raí Felipe, pelo apoio técnico nas simulações, pela disposição em ensinar o uso do software ANSYS Workbench e por contribuir diretamente para a obtenção dos resultados apresentados. Agradeço também ao Dr. Carlos Rodriguez, por suas aulas excepcionais, pela compreensão diante das dificuldades inerentes ao curso e por motivar-me a alcançar o melhor desempenho possível em todas as minhas obrigações.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento profissional e pessoal, deixo aqui o meu sincero reconhecimento e agradecimento.

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.

RADOMES PARA SUBMARINO: Materiais, Tecnologias e Aplicações para a Marinha do Brasil

Guilherme Villaça Martins Ribeiro

Novembro/2025

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

Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo analisar o desenvolvimento, os materiais, as tecnologias e as aplicações de radomes empregados em submarinos, com foco em suas propriedades estruturais e eletromagnéticas sob condições extremas de operação. Foi realizado um levantamento histórico e técnico abrangente, abordando a evolução dos materiais desde os primeiros modelos em madeira e *Plexiglas* até os compósitos avançados utilizados na atualidade. A pesquisa contemplou a avaliação de diferentes tipos de fibras e matrizes, com destaque para os compósitos *E-Glass*/Epóxi, *H-Glass*/Epóxi e Carbono/Epóxi por meio de simulações de elementos finitos no *ANSYS Workbench*, que permitiram determinar a deformação total, tensão equivalente e deformação elástica equivalente sob carga hidrostática de 5 MPa. Os resultados indicaram que o compósito *H-Glass*/Epóxi apresenta o melhor equilíbrio entre transparência eletromagnética e resistência mecânica, configurando-se como a alternativa mais promissora para aplicação em radomes submersos da Marinha do Brasil. O estudo também destacou que as estruturas tipo A-sanduíche e C-sanduíche oferecem desempenho superior em termos de distribuição de tensões e permeabilidade às ondas de radar.

Palavras-chave: Radome; Submarino; Compósitos; Simulação Estrutural; Transparência Eletromagnética

ABSTRACT

Abstract of the Course Completion Paper presented to CIAA/MB as a partial requirement for the completion of the Advanced Improvement Course for Navy Officers.

RADOMES FOR SUBMARINES: Materials, Technologies, and Applications for the Brazilian Navy

Guilherme Villaça Martins Ribeiro

November/2025

Advisors: Dr. Roberto da Costa Lima
1ºTen (EN) João Paulo da Silva Queiroz Menezes

Advanced Improvement Course in Electronic Warfare

The present Course Conclusion Paper aimed to analyze the development, materials, technologies, and applications of radomes employed in submarines, focusing on their structural and electromagnetic properties under extreme operating conditions. A comprehensive historical and technical survey was carried out, addressing the evolution of materials from the earliest models made of wood and Plexiglas to the advanced composites currently in use. The research included the evaluation of different types of fibers and matrices, with emphasis on the E-Glass/Epoxy, H-Glass/Epoxy, and Carbon/Epoxy composites, through finite element simulations performed in the ANSYS Workbench. These analyses enabled the determination of total deformation, equivalent stress, and equivalent elastic strain under a hydrostatic pressure load of 5 MPa. The results indicated that the H-Glass/Epoxy composite presents the best balance between electromagnetic transparency and mechanical strength, establishing itself as the most promising alternative for application in submarine radomes of the Brazilian Navy. The study also highlighted that sandwich-type structures, particularly the A-sandwich and C-sandwich configurations, provide superior performance in terms of stress distribution and radar wave permeability.

Keywords: Radome; Submarine; Composites; Structural Simulation; Electromagnetic Transparency

Lista de Tabelas

1	Evolução dos Materiais de Radomes para Submarinos (1940 – Atualidade)	8
2	Propriedades físicas e elétricas recomendadas para materiais aplicados em radomes.	13
3	Propriedades mecânicas e físicas dos materiais utilizados na simulação.	27
4	Resultados obtidos nas simulações de elementos finitos.	35

Lista de Figuras

1	Radome de submarino.....	3
2	Aeronave B-18A.....	6
3	Modelos de radomes de submarinos.....	9
4	Configurações de paredes de radomes: (a) monolítica; (b) A-sanduiche; (c) multicamadas ou C-sanduiche.	18
5	Formatos padrão de cabeças de radomes sob alta pressão: (a) plano; (b) esférico; (c) elíptico.....	19
6	Estrutura de radome em formato inovador	20
7	Imagem do <i>ANSYS</i> com os Modelos Empregados.....	26
8	Malha gerada para o modelo tridimensional do radome.....	29
9	Aplicação da pressão de 5 MPa sobre a superfície externa do radome.....	30
10	Condição de contorno do tipo <i>Fixed Support</i> aplicada à base do radome.	30
11	Orientações das fibras no laminado definidas no módulo ACP do <i>ANSYS Workbench</i>	31
12	Distribuição da deformação total.....	32
13	Distribuição da deformação elástica equivalente.....	33
14	Distribuição da tensão equivalente.....	34

Lista de Símbolos

Latinos

n – número inteiro que representa o múltiplo de meia onda desejado

d' – distância ótima entre a antena e o radome

Gregos

λ – comprimento de onda

ε_r – constante dielétrica relativa do material

δ – tangente de perda

λ_0 – comprimento de onda no vácuo

Lista de Abreviaturas e Siglas

SLL	<i>Sidelobe Level</i> – Nível de Lóbulos Laterais
BSE	<i>Boresight Error</i> – Erro de Apontamento
FRPs	<i>Fiber Reinforced Polymers</i> – Polímeros Reforçados com Fibra
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i> – Polietileno Tereftalato
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i> – Policloreto de Vinila
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> – Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> – Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro
RF	Radiofrequência
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> – Análise por Elementos Finitos
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i> – Relação de Onda Estacionária de Tensão
MEF	Método Dos Elementos Finitosa
ACP	<i>ANSYS Composite PrepPost</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Desafios Únicos do Ambiente Submarino	2
1.2 Objetivos Gerais.....	3
1.3 Objetivos Específicos	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Histórico	5
2.1.1 Estado da Arte dos Radomes	7
2.2 Materiais Utilizados para Construção dos Radomes	9
2.2.1 Materiais Compósitos	10
2.2.2 Matriz	13
2.2.3 Núcleos.....	16
2.3 Estruturas.....	15
2.4 Formas	18
2.5 Métodos de Fabricação dos Radomes.....	20
2.6 Métodos de Análise dos Radomes.....	21
2.7 Interação Radar-Radome.....	22
3 METODOLOGIA	24
4 SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS	25
4.1 Materiais.....	26
4.1.1 <i>E-Glass</i>	27
4.1.2 <i>H-Glass</i>	28
4.1.3 Fibra de Carbono	28
4.1.4 Resina Epóxi.....	28
4.2 ANSYS Composite PrepPost.....	28
4.3 Apresentação dos Resultados	32
4.4 Discussão.....	34
5 CONCLUSÃO	35
5.1 Trabalhos Futuros.....	37

1 INTRODUÇÃO

O termo *radome* resulta da junção das palavras em inglês *radar* e *dome*, referindo-se a uma estrutura em forma de cúpula projetada para proteger antenas de radar ou de comunicações contra agentes ambientais adversos, sem comprometer sua transparência eletromagnética. Essas estruturas desempenham funções múltiplas, como proteger os equipamentos contra intempéries, ocultar visualmente a antena, simplificar suportes mecânicos e, sobretudo, preservar o desempenho eletromagnético, minimizando alterações em parâmetros como padrão de radiação, perda por inserção, lóbulos laterais, eficiência de polarização e erro de apontamento (Andrade, 2022; Soumya *et al.*, 2017). Desde a Segunda Guerra Mundial, quando surgiram os primeiros modelos associados ao desenvolvimento dos radares de micro-ondas, os radomes vêm evoluindo em termos de materiais, formatos e métodos construtivos, de modo a atender às crescentes demandas militares, aeronáuticas e navais (Kozakoff, 2010; Shavit, 2018).

De acordo com Andrade (2022), apesar de sua função protetiva, a presença de um radome pode alterar as características elétricas da antena, modificando parâmetros críticos como padrão de radiação e perda de retorno. Entre as métricas utilizadas para avaliar o desempenho de um radome, destacam-se: perda por inserção, resultante da redução da intensidade do sinal quando a onda eletromagnética atravessa o material dielétrico; nível de lóbulos laterais (SLL – *sidelobe level*), que pode aumentar devido a efeitos de reflexão e espalhamento; eficiência de polarização, que pode ser comprometida por diferenças de transmissão entre polarizações ou pela curvatura da estrutura; e erro de apontamento (BSE – *boresight error*), decorrente da distorção da onda, desviando o ângulo de chegada aparente do sinal.

A perda por inserção está associada a reflexões nas interfaces ar/material, refração, difração, deslocamento de polarização e absorção no dielétrico. Alterações no padrão de radiação podem resultar da redistribuição de energia causada por reflexão e espalhamento, modificando a forma do lóbulo principal e elevando o SLL. A eficiência de polarização, por sua vez, pode ser degradada quando a curvatura e as propriedades do material provocam desvio da polarização original para outra ortogonal. Já o BSE é causado pelo encurvamento do percurso da onda ao atravessar a parede do radome, deslocando a direção aparente de incidência (Andrade, 2022).

A literatura aponta o uso de diferentes materiais para a fabricação de radomes, incluindo compósitos poliméricos reforçados por fibras de vidro, carbono, aramida e basalto, além de materiais cerâmicos como alumina, sílica fundida, pirocerâmicos e

nitretos. Cada um apresenta vantagens e limitações em termos de desempenho mecânico, térmico e eletromagnético. Entre os requisitos fundamentais para a seleção de materiais aplicados a radomes, destaca-se a transparência eletromagnética, isto é, a capacidade do material de permitir a passagem das ondas eletromagnéticas sem provocar distorções relevantes. Essa característica é alcançada pelo emprego de materiais dielétricos com baixa tangente de perdas, o que minimiza a dissipação de energia por absorção, e baixa refletividade, reduzindo a interferência no sinal irradiado ou recebido pelas antenas. Mais recentemente, os compósitos híbridos, que combinam diferentes tipos de fibras e matrizes, têm se mostrado alternativas promissoras para otimizar simultaneamente as propriedades físicas, mecânicas e dielétricas dessas estruturas (Britto; Kumar, 2016; Kumar; Gupta, 2019; Heydari *et al.*, 2016; Reddy; Anuradha; Nikhil, 2015).

Os radomes podem apresentar diferentes formas – esféricas, cilíndricas, planas ou geodésicas – e são aplicados em aeronaves, navios, submarinos, veículos terrestres e instalações fixas, sempre com projetos adaptados às exigências mecânicas e eletromagnéticas de cada cenário operacional. Além da escolha da forma, fatores como a configuração estrutural (monolítica, A-sanduiche ou C-sanduiche), os métodos de fabricação, incluindo moldagem a vácuo, enrolamento filamentar e moldagem em autoclave, exercem influência direta sobre o desempenho final dessas estruturas (Ashok; Dala, 2016; Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014).

1.1 Desafios Únicos do Ambiente Submarino

Nos radomes destinados a aplicações submersas, é necessário que a estrutura suporte pressões hidrostáticas elevadas, da ordem de 70 bar, o que torna os requisitos ambientais um fator determinante no processo de projeto. Em condições ideais, o radome atua como uma estrutura mecânica eletromagneticamente transparente, característica que depende diretamente da escolha e combinação adequadas de materiais e de sua compatibilidade com a aplicação e com a faixa de frequência de operação (Britto; Kumar, 2016).

As funções principais de um radome para uso em submarinos incluem:

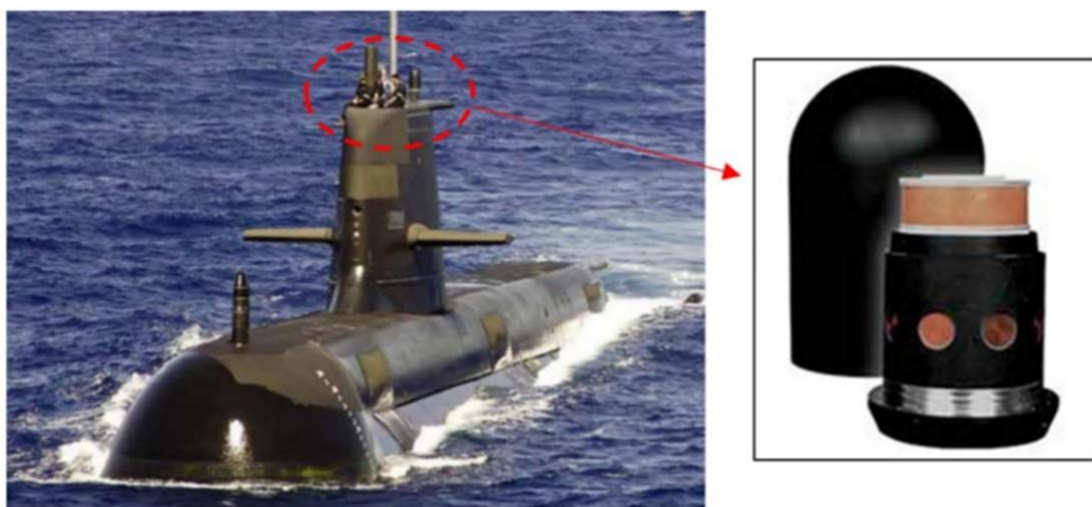
1. Proteger a instalação contra efeitos degradantes do ambiente, aumentando a durabilidade da antena e de outros equipamentos associados;
2. Contribuir para o aumento do desempenho global da antena;
3. Permitir economia geral e redução de peso na instalação;
4. Garantir o funcionamento eficiente da antena embarcada, mesmo sob elevada

coluna de água sobre o submarino (Britto; Kumar, 2016).

Radomes para submarinos são, em geral, construídos a partir de estruturas do tipo sanduíche, utilizando materiais com baixa constante dielétrica, de forma a minimizar a interferência com a propagação de ondas eletromagnéticas. A seleção correta desses materiais pode melhorar o desempenho da antena e garantir sua durabilidade em aplicações marítimas, sendo fundamental considerar a relação resistência-peso do compósito, a rigidez estrutural e a resistência à corrosão (Waqas *et al.*, 2019). A eficácia de um radome está diretamente relacionada à compatibilidade entre sua configuração, a composição dos materiais utilizados, a aplicação específica e a faixa de frequência de operação (Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014).

A Figura 1 ilustra um radome de alta pressão utilizado em submarinos, caracterizado por uma elevada relação entre altura e largura, além de apresentar espessura consideravelmente elevada. Nesse cenário, evidencia-se a relevância de realizar uma análise eletromagnética para avaliar como o radome pode influenciar o desempenho da antena (Andrade, 2022).

Figura 1: Radome de submarino.



Fonte: Andrade (2022).

1.2 Objetivos Gerais

Este trabalho tem por objetivo geral investigar radomes aplicados em submarinos, com ênfase nos materiais, processos construtivos, requisitos operacionais e tendências tecnológicas e, possivelmente, avaliando sua aplicabilidade à realidade da Marinha do Brasil.

1.3 Objetivos Específicos

O presente estudo tem como objetivo principal mapear os materiais empregados mundialmente na construção de radomes para submarinos, com ênfase em fibras de vidro, cerâmicas, compósitos avançados e diferentes tipos de resinas. A investigação busca compreender a diversidade de soluções estruturais adotadas internacionalmente e suas implicações no desempenho global dessas estruturas.

A análise contempla as propriedades fundamentais dos materiais, incluindo transparência eletromagnética, resistência mecânica e hidrostática, comportamento frente à corrosão marinha e efeitos do envelhecimento. Esses parâmetros são essenciais para garantir a integridade estrutural e a eficiência eletromagnética dos radomes em condições operacionais severas.

Adicionalmente, o trabalho propõe identificar diretrizes técnicas e parâmetros aplicáveis, de forma a assegurar conformidade com os padrões internacionais de desempenho e confiabilidade. Essa etapa visa consolidar referências técnicas que orientem o desenvolvimento e a avaliação de radomes destinados ao ambiente submarino.

Propõe-se também a simulação de um radome de submarino utilizando os materiais selecionados ao longo da pesquisa, a fim de avaliar seu comportamento estrutural sob condições reais de operação subaquática. Essa simulação será conduzida com base em modelos tridimensionais e análises pelo método dos elementos finitos, considerando variáveis como pressão hidrostática, espessura da parede, constante dielétrica e tangente de perda dos materiais. O propósito dessa etapa é verificar a influência das propriedades físicas na resistência mecânica da estrutura em profundidades elevadas. Dessa forma, busca-se validar a aplicabilidade dos materiais estudados e subsidiar o desenvolvimento de radomes mais eficientes, confiáveis e adequados às necessidades operacionais da Marinha do Brasil.

Por fim, com base nos resultados obtidos, serão apresentadas recomendações fundamentadas em evidências para orientar futuras aquisições e desenvolvimentos conduzidos pela Marinha do Brasil, além de sugerir possíveis linhas de pesquisa experimental em cooperação com instituições estratégicas, como o Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo dos radomes tem sua origem diretamente associada à evolução dos sistemas de radar e às necessidades de proteção das antenas contra as condições

ambientais. Desde os primeiros modelos desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial até as configurações modernas aplicadas em aeronaves, navios e submarinos, observa-se uma trajetória marcada pela introdução de novos materiais e métodos construtivos que visam equilibrar transparência eletromagnética e resistência mecânica (Kozakoff, 2010; Shavit, 2018; Sandeep *et al.*, 2017).

Nesse contexto, o referencial teórico apresentado busca mapear a evolução histórica dos radomes, discutir os materiais empregados em sua fabricação, as estruturas mais recorrentes, bem como os formatos e os métodos de produção e análise. O objetivo é oferecer uma base consolidada para compreender os avanços já obtidos na área e os desafios ainda existentes, em especial no que se refere às aplicações navais submersas, que impõem exigências singulares de desempenho e durabilidade (Britto; Kumar, 2016; Waqas *et al.*, 2019).

2.1 Histórico

Antes do uso de radomes, aeronaves de baixa velocidade no início da Segunda Guerra Mundial transportavam radares VHF que utilizavam antenas montadas externamente do tipo Yagi ou arranjos de dipolos. Com o advento do radar de micro-ondas em aeronaves de maior velocidade, tornou-se necessária uma forma de proteger as antenas contra as condições físicas do ambiente de voo (Kozakoff, 2010).

Houve uma necessidade ainda maior de proteger as antenas aerotransportadas quando o radar de micro-ondas surgiu pela primeira vez nos Estados Unidos em 1940. Inicialmente, a *Sperry Rand Corporation* testou uma unidade experimental suspensa no compartimento de bombas aberto de uma aeronave B-18. Aproximadamente na mesma época, a introdução do magnetron de micro-ondas de alta potência, proveniente da Inglaterra, impulsionou o rápido desenvolvimento de radares tanto militares quanto civis (Kozakoff, 2010).

Os primeiros radomes aeronáuticos registrados utilizavam projetos simples, de parede fina. Em 1941, o primeiro radome em voo foi um radome de nariz hemisférico fabricado em Plexiglas, que protegia um radar experimental na banda S, da *Western Electric*, instalado em uma aeronave B-18A, como apresentada na Figura 2. A partir de 1943, radares aerotransportados passaram a utilizar radomes de madeira compensada com 0,25 polegada de espessura (Kozakoff, 2010).

Figura 2: Aeronave B-18A



Fonte: Kozakoff (2010).

Nesse período, radomes de madeira compensada também apareceram em barcos-patrolha da *MarKoz* Americana e dirigíveis, bem como em instalações terrestres. Como a madeira compensada apresenta problemas de absorção de umidade e não se dobra facilmente em formas de curvatura dupla, novas técnicas e materiais de construção de radomes foram introduzidos. Em 1944, o Laboratório de Radiação do MIT desenvolveu o modelo de três camadas do tipo A-sanduíche, que utilizava superfícies densas e um material de núcleo de baixa densidade. As superfícies eram fabricadas em fibra de vidro e o núcleo em poliestireno. Desde a Segunda Guerra Mundial, os materiais para radomes evoluíram nas seguintes áreas: cerâmicas para radomes de mísseis de alta velocidade, quartzo, fibra de vidro, núcleo tipo colmeia (*honeycomb*) e espuma para radomes compostos do tipo sanduíche. Atualmente, a maioria dos radomes aeronáuticos utiliza projetos com paredes do tipo sanduíche (Shavit, 2018).

Historicamente, diversos materiais foram empregados na construção de radomes. As primeiras estruturas utilizavam madeira balsa e compensado, enquanto os modelos modernos, tanto terrestres quanto navais, passaram a ser fabricados com compósitos de fibras de vidro, quartzo ou aramida, unidos por matrizes poliméricas como poliéster, epóxi e outras resinas. Frequentemente, entre as camadas interna e externa (pele) do radome são inseridos núcleos de espuma ou colmeia, que atuam como espaçadores de baixa constante dielétrica, conferindo resistência estrutural e rigidez ao conjunto (Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014).

Técnicas avançadas de análise de projeto computadorizada também surgiram como resultado dos requisitos de desempenho eletrônico para novos aviônicos e radares. A divulgação de dados sobre tecnologia de radomes por meio de diversos

simpósios tem sido a principal força motriz no avanço dessas técnicas de análise computadorizada de projeto. O mais conhecido desses simpósios foi, provavelmente, o bienal *Electromagnetic Window Symposium*, realizado no *Georgia Institute of Technology*, em Atlanta, Geórgia (Kozakoff, 2010).

Atualmente, os radomes possuem ampla aplicação em sistemas eletrônicos terrestres, marítimos, veiculares, aeronáuticos e de mísseis. Podem ser projetados em diferentes formatos como esféricos, geodésicos ou planos, de acordo com a aplicação específica, utilizando diversos tipos de materiais construtivos. O desenvolvimento de um radome apresenta um desafio particular, pois seus parâmetros de desempenho tendem a estar em conflito direto, exigindo um processo iterativo de projeto até que todos os requisitos concorrentes sejam atendidos de forma otimizada. Essa etapa de concepção envolve um equilíbrio entre transparência eletromagnética e resistência mecânica. Há uma ampla variedade de materiais dielétricos disponíveis, cada um com características próprias, que englobam propriedades elétricas, mecânicas, resistência a condições ambientais e custo (Sandeep *et al.*, 2017).

A Tabela 1 apresenta a evolução dos materiais empregados na construção dos radomes ao longo do tempo e resume seus empregos nas respectivas épocas.

2.1.1 Estado da Arte dos Radomes

A literatura atual foca os estudos em materiais, formas e estruturas que melhor sejam empregados na construção de radomes de submarinos com alto desempenho.

Dentre os materiais encontrados, destacam-se a fibra de vidro (com variações como *E-glass*, *S-glass* e *H-glass*), o tecido de quartzo, a fibra de aramida (Kevlar) e as fibras de carbono. Cada material possui características próprias que, dependendo da necessidade, apresentam um melhor ou pior desempenho. Em relação à menor constante dielétrica, a fibra de aramida apresenta vantagem; quanto à resistência mecânica, a fibra de carbono se sobressai; e no aspecto de custo-benefício, a fibra de vidro é a mais adequada. Outro aspecto importante é a banda de frequências em que o radome é capaz de operar, minimizando a interferência na onda eletromagnética incidente. Nesse contexto, a fibra de vidro H-glass apresenta melhor desempenho, atuando eficientemente em frequências de 15 kHz a 18 GHz, o que a torna ideal para a banda X (8.2 a 12.4 GHz) quando se tratando do ambiente militar (Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014; Sandeep *et al.*, 2017; Ramanamurthy; Krishna, 2016).

As formas e estruturas também são fatores determinantes no projeto de radomes para submarinos, pois influenciam diretamente a capacidade de suportar altas pressões, a hidrodinâmica e o ângulo de incidência da onda eletromagnética. O formato cilíndrico com tampa elíptica é o mais comum entre os estudados. No entanto, pesquisas recentes

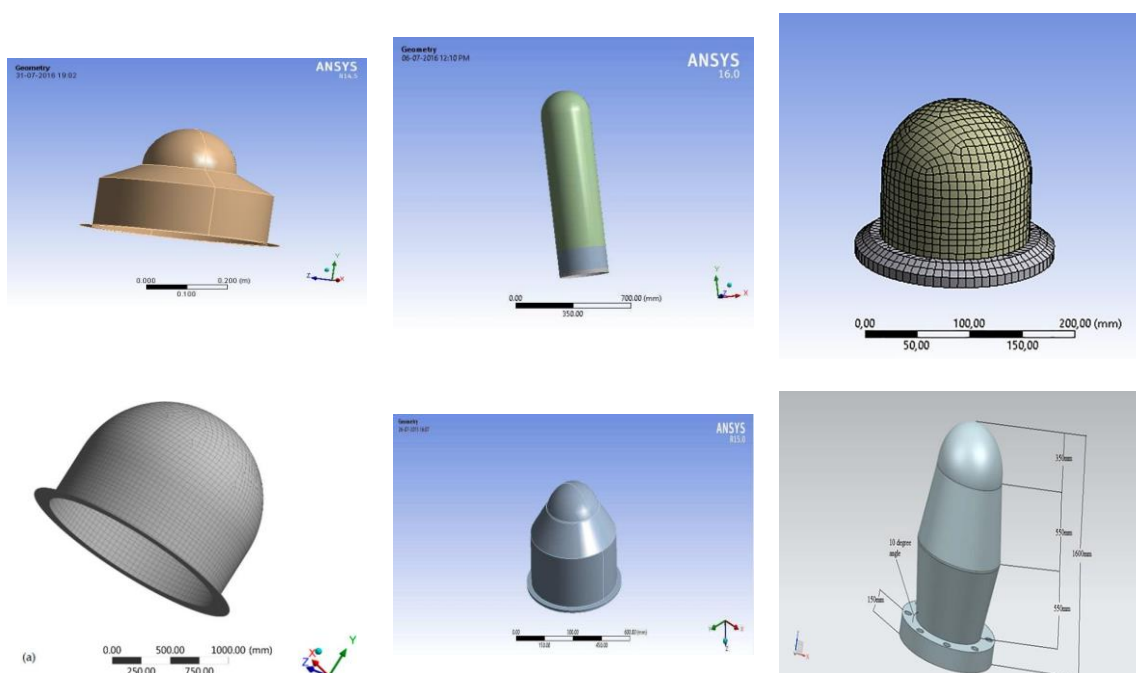
têm proposto geometrias inovadoras para otimizar o desempenho estrutural e eletromagnético. Entre as configurações construtivas, destacam-se as estruturas do tipo A-sanduiche, C-sanduiche e híbridas, frequentemente aplicadas em projetos de radomes navais (Saikrishna; Anasuya, 2019; Kumar; Sushma; Swamy, 2017; Tahseen; Yang; Uddin, 2020).

A Figura 3 reúne exemplos de modelos descritos na literatura, evidenciando a ampla variedade de formas e soluções construtivas aplicadas a radomes de submarinos.

Tabela 1: Evolução dos Materiais de Radomes para Submarinos (1940 – Atualidade)

Período / Marco Histórico	Materiais Utilizados	Aplicações / Observações	Referência
Início da 2ª Guerra Mundial (antes dos radomes)	Antenas sem radome (Yagi, dipolos)	Montadas em aeronaves de baixa velocidade com radares VHF	Kozakoff (2010)
1940 – Surgimento do primeiro radar de micro-ondas	Antenas ainda sem proteção	Testes Sperry Rand em B-18; desenvolvimento acelerado de radares	Kozakoff (2010)
1941 – 1º radome em voo	Plexiglas (radome hemisférico de nariz)	Protegia radar S-band em B-18A	Kozakoff (2010)
1943 – Produção de radomes aerotransportados	Madeira compensada (0,25")	Aeronaves, barcos-patrolha, dirigíveis, instalações terrestres	Kozakoff (2010)
1944 – Inovação estrutural	Fibra de vidro (skins) + poliestireno (A-sandwich)	Desenvolvido no MIT Radiation Lab; maior leveza e resistência	Shavit (2018)
Pós-Segunda Guerra Mundial	Cerâmicas, quartzo, fibra de vidro, núcleos honeycomb e espuma	Radomes compostos tipo sanduiche para mísseis, aeronaves e navios	Shavit (2018)
Estruturas modernas (séc. XXI)	Compósitos de vidro, quartzo, aramida; matrizes poliméricas (epóxi, poliéster); núcleos de espuma/honeycomb	Elevada transparência EM, resistência mecânica e proteção ambiental	Srinivasulu, Khan e Jaikrishna (2014), Sandeep <i>et al.</i> (2017)
Atualidade	Dielétricos diversos (vidro, quartzo, fibras, cerâmicas avançadas, polímeros, híbridos)	Aplicações terrestres, marítimas, veiculares, aeronáuticas e de mísseis; exigem equilíbrio entre transparência EM e resistência estrutural	Sandeep <i>et al.</i> (2017)

Figura 3: Modelos de radomes de submarinos.



Fontes: Britto e Kumar (2016), Ramanamurthy e Krishna (2016), Özdemir *et al.* (2020), Waqas *et al.* 2019), Srinivasulu, Khan e Jaikrishna (2014), Tahseen, Yang e Uddin (2020).

2.2 Materiais Utilizados para Construção dos Radomes

Devido às suas propriedades de alta resistência, baixo peso, flexibilidade de projeto e excelente resistência à corrosão, os polímeros reforçados com fibra (*Fiber Reinforced Polymers* – FRPs) têm sido amplamente empregados como materiais estruturais e de reforço em aplicações marítimas, militares, químicas e de infraestrutura civil. Em projetos de engenharia recentes, especialmente nos setores de turbinas eólicas, aeroespacial, pontes rodoviárias e ambientes oceânicos, têm se destacado requisitos práticos que dificilmente podem ser atendidos com materiais convencionais como o aço e o concreto. Nesse cenário, evidencia-se a importância da pesquisa e desenvolvimento de FRPs com multifuncionalidade, alto desempenho e capacidade de adaptação estrutural (Waqas *et al.*, 2019).

A seleção de fibras para a fabricação de radomes é uma etapa crucial no desempenho dessas estruturas. Cada tipo de fibra apresenta propriedades físicas específicas que determinam sua adequação à aplicação. Em determinadas proporções, fibras de grafite ou carbono, por exemplo, são eletricamente e termicamente condutivas, sendo preferidas em aplicações que exigem condução elétrica, como refletores de antena ou absorção de ondas eletromagnéticas, dissipando a energia da onda em calor. Já em radomes, nos quais a transmissibilidade de radar é essencial, as

fibras de vidro, quartzo e de aramida são os materiais mais utilizados. Apesar de o Kevlar apresentar maior resistência em comparação às fibras de vidro, sua absorção de umidade e baixa resistência à compressão o tornam menos adequado para radomes de submarinos. Além disso, a escolha do material deve levar em conta propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade e resistência mecânica, e térmicas, como coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica. Essas variáveis orientam a definição da fibra mais apropriada em função do ambiente de operação (Ramanamurthy; Krishna, 2016).

No caso específico dos radomes de submarinos, predominam compósitos formados por quartzo, fibras de vidro e filamentos de aramida, unidos por resinas como epóxi, poliéster ou outros sistemas poliméricos. Nessas estruturas, o laminado compõe as camadas externas e internas (peles), enquanto o núcleo é formado, em muitos casos, por estruturas tipo colmeia ou espumas de baixa constante dielétrica, responsáveis por garantir rigidez e resistência sem comprometer a transparência eletromagnética. Entretanto, em aplicações subaquáticas, onde as pressões em grandes profundidades são extremamente elevadas, os núcleos convencionais de espuma podem ser insuficientes. Nesses cenários, núcleos de madeira com baixa constante dielétrica, mas com maior resistência mecânica, têm se mostrado alternativas mais adequadas para suportar as condições extremas de operação (Waqas *et al.*, 2019).

2.2.1 Materiais Compósitos

Os radomes contemporâneos exigem materiais que combinem elevado desempenho mecânico, estabilidade dimensional, baixa constante dielétrica e alta transparência eletromagnética. Nesse cenário, os compósitos laminados reforçados com fibras e estruturas do tipo sanduíche são amplamente aplicados na indústria marítima. Entre eles, destacam-se os compósitos formados por filamentos de *E-glass* e resina epóxi, amplamente reconhecidos pela elevada transparência a micro-ondas, excelentes propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão, característica essencial para a redução de assinaturas magnéticas e eletrônicas (Waqas *et al.*, 2019).

O *E-glass*, ou vidro de grau elétrico, inicialmente desenvolvido para isoladores suspensos em sistemas de fiação elétrica, demonstrou excelente capacidade de formação de fibras, passando a ser usado quase exclusivamente como reforço em compósitos. Trata-se de um vidro de baixo teor de álcali, cuja composição típica (em %) inclui: SiO_2 – 54%, Al_2O_3 – 14%, $\text{CaO} + \text{MgO}$ – 22%, B_2O_3 – 10% e $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ < 2%, além de possíveis impurezas residuais. Suas propriedades de baixo custo,

elevada resistência, rigidez, baixa densidade, resistência química, não inflamabilidade, isolamento elétrico e estabilidade em diferentes condições operacionais, consolidaram-no como um dos materiais mais utilizados em radomes. Contudo, o *E-glass* apresenta limitações, como baixo módulo elástico, autoabrasividade quando não tratado, baixa resistência à fadiga e densidade superior à de fibras de carbono e orgânicas (Ramanamurthy; Krishna, 2016).

Estudos comparativos apontam o *E-glass* como o material que apresenta o menor nível de tensão sob pressão, característica que, associada à sua natureza dielétrica, justifica seu uso predominante. Entretanto, avanços recentes indicam o potencial dos compósitos híbridos para superar limitações mecânicas e elétricas. A associação de fibras de carbono e *E-glass* em um mesmo laminado possibilita variação do tipo e da fração em peso das fibras, ampliando a flexibilidade de projeto e permitindo ganhos simultâneos em propriedades físicas, mecânicas e eletromagnéticas. Essa estratégia viabiliza radomes mais leves, resistentes e eficientes em contextos militares, aeroespaciais e navais. Ainda assim, há escassez de estudos sistemáticos sobre compósitos termofixos híbridos aplicados a radomes, evidenciando a necessidade de novas pesquisas (Britto; Kumar, 2016).

Entre as inovações, destacam-se as fibras de vidro ocas (*H-glass*), produzidas a partir de vidro aluminoborosilicato livre de álcali, utilizando tecnologia de precisão com matrizes de multifiação de platina em processo patenteado. As fibras resultantes possuem formato tubular, com diâmetro externo de 10–12 μm e capilar interno de 5–6 μm , composição típica de 94% de SiO_2 , 10% de $\text{CaO} + \text{MgO}$ e menos de 0,1% de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$. Suas propriedades únicas de baixo peso, alta resistência específica e alta rigidez, tornam o *H-glass* altamente atrativo para compósitos aplicados às indústrias aeroespacial e naval. Comparado ao *E-glass*, apresenta densidade menor, reduzindo o peso de laminados em até 40%, além de ser mais elástico, resistente à compressão e possuir melhores características dielétricas, térmicas e acústicas. Comercialmente, está disponível em versões de 160 *gsm* e 220 *gsm*. Ensaio realizados com amostras de 16 mm e 18 mm de espessura, comparando o *H-Glass*, *E-Glass* e *S-Glass*, comprovaram o desempenho superior do primeiro: constantes dielétricas mais baixas, menores fatores de perda e desempenho equivalente entre polarizações (Ramanamurthy; Krishna, 2016).

O *S-glass* surgiu como evolução do *E-glass*, projetado para superar suas limitações mecânicas. Com composição típica de 65% de SiO_2 , 25% de Al_2O_3 e 10% de MgO , oferece propriedades superiores, incluindo maior resistência, rigidez, baixa densidade,

resistência ao calor, à ação química e à umidade, além de manter desempenho em diferentes ambientes. Contudo, apresenta desvantagens como custo significativamente maior que o *E-Glass*, tendência à autoabrasividade, baixa resistência à fadiga e densidade mais elevada que fibras de carbono e orgânicas (Ramanamurthy; Krishna, 2016).

Outros materiais avançados também têm relevância. As fibras de carbono, com diâmetro de 5–10 μm e 93% de carbono em sua composição, destacam-se pela alta rigidez, resistência à tração, baixa expansão térmica, elevada resistência química e tolerância a altas temperaturas, mas possuem custo elevado em comparação a alternativas como o vidro. Já as fibras de basalto, compostas por minerais como plagioclásio, piroxênio e olivina, apresentam resistência específica três vezes superior à do aço, alta compatibilidade com resinas e resistência química superior ao vidro. Sua composição varia entre 51,6–59,3% de SiO_2 , 14,6–18,3% de Al_2O_3 , 5,9–9,4% de CaO , 3–5,3% de MgO , 3,6–5,2% de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, 9–14% de $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$ e 0,8–2,25% de TiO_2 , combinando custo acessível e propriedades mecânicas robustas (Saikrishna; Anasuya, 2019).

Além dos compósitos poliméricos, materiais cerâmicos vêm sendo explorados para cenários de alta temperatura. A alumina (Al_2O_3), amplamente aplicada em radomes de mísseis acima de *Mach* 2, suporta temperaturas superiores a 1760 °C quando em purezas acima de 97%. O *Lucalox*, com 99,9% de pureza, é considerado referência nessa classe, especialmente quando adicionado a pequenas quantidades de óxido de magnésio. Apesar de impermeáveis, resistentes a químicos e com constante dielétrica de 9,6 à temperatura ambiente (reduzida até 800 °C), cerâmicas de Al_2O_3 sofrem contrações relevantes durante a moldagem (Kumar; Gupta, 2019).

Outras opções incluem o pirocerâmico, cuja constante dielétrica e resistência mecânica mantêm-se estáveis até 700 °C, alcançando esse limite em voos a *Mach* 5. O *Pyroceram 9606* (cordierita) apresentou alta resistência ao choque térmico, corrosão e abrasão, mas não suporta variações dielétricas acima dessa faixa. Já o *Pyroceram 9603* mostrou desempenho térmico superior, embora com maior tangente de perdas (Kumar; Gupta, 2019).

A sílica fundida e o vidro de quartzo destacam-se por sua baixa condutividade térmica, baixo coeficiente de expansão, boa resistência mecânica e elevada resistência a choques térmicos. Mantêm estabilidade dielétrica até 800 °C, com tangente de perdas entre 0,0002 e 0,0014 e condutividade entre 1,8–2,7 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Apesar de inferiores às vitrocerâmicas, essas propriedades os tornam aplicáveis em cadinhos metalúrgicos,

indústria de polissilício, aeronáutica e componentes de micro-ondas em altas temperaturas (Kumar; Gupta, 2019).

O nitreto de boro, embora eletricamente adequado, apresenta limitações mecânicas, com resistência à flexão de 100 MPa à temperatura ambiente, caindo para 30 MPa a 750°C. Sua maciez compromete a resistência à chuva, restringindo aplicações. Por outro lado, o nitreto de silício (Si_3N_4) combina permeabilidade eletromagnética, resistência térmica, resistência a choques e à corrosão, sendo considerado um dos materiais cerâmicos mais promissores para radomes. No entanto, suas constantes dielétricas (5,6 para $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ e 7,9 para $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$) são elevadas, limitando sua aplicação direta em radomes (Kumar; Gupta, 2019).

Como discutido por Kumar e Gupta (2019), a definição de propriedades mínimas de desempenho é essencial no processo de seleção de materiais destinados à fabricação de radomes. Esses parâmetros garantem que o material apresente adequada transparência eletromagnética, estabilidade térmica e resistência mecânica compatíveis com as exigências operacionais. A Tabela 2 sintetiza as principais propriedades recomendadas para que um material seja considerado apto à aplicação em radomes de alta performance.

Tabela 2: Propriedades físicas e elétricas recomendadas para materiais aplicados em radomes.

Propriedade	Valor Recomendado
Temperatura de serviço	Até 1400 °C
Constante dielétrica (ϵ_r)	< 9,0 (ideal: 5,0)
Variação da constante dielétrica com a temperatura	< 7,0% até 1260 °C
Tangente de perda ($\tan \delta$) até 1260 °C	< 0,1
Resistência à flexão (ensaio de quatro pontos)	> 35 MPa

Fonte: Adaptado de Kumar e Gupta (2019).

2.2.2 Matriz

A fase plástica que mantém unidas as fibras de reforço é denominada matriz. Esse material atua como meio de transferência de carga entre as fibras, além de protegê-las contra os efeitos ambientais e conferir forma e acabamento ao compósito. Diversos tipos de matrizes estão disponíveis, podendo ainda receber aditivos para melhorar propriedades específicas, como dureza e resistência à temperatura. Entre os principais aditivos utilizados estão agentes de cura, cargas e estabilizadores (Ramanamurthy; Krishna, 2016).

As resinas que compõem a matriz podem ser classificadas em termoplásticas ou termofixas. As termofixas têm ampla aplicação na indústria de compósitos, as resinas de poliéster, éster vinílico, epóxi, fenólicas e éster cianato destacam-se como as de uso comum. Na seleção de uma resina compatível com as fibras, devem ser avaliadas considerações como compatibilidade de dimensionamento e molhabilidade, cisalhamento interlaminar, absorção de água, temperatura de cura e fatores correlatos, incluindo tensões residuais do laminado, expansão das ferramentas, temperatura máxima de uso, temperatura de transição vítrea e microfissuração. Também são relevantes as características de fluxo, o método de processamento e propriedades mecânicas, como resistência ao cisalhamento e à tração, módulo e compatibilidade de deformação com a fase de reforço. Aspectos físicos, como desgaseificação e difusividade de umidade, bem como fatores de toxicidade, custo, disponibilidade e estabilidade da cadeia de suprimentos, também devem ser considerados (Ramanamurthy; Krishna, 2016).

Historicamente, radomes termoplásticos foram empregados em aplicações de ondas milimétricas, mas logo foram substituídos por termoplásticos avançados, devido à maior resistência destes à erosão causada pela chuva, à absorção de umidade e a impactos. Ainda assim, as resinas termofixas são as mais utilizadas em radomes civis e militares, devido à facilidade de processamento, melhores propriedades mecânicas e coeficientes de expansão térmica significativamente menores. Algumas dessas matrizes suportam temperaturas entre 350 °C e 400 °C, superando amplamente os limites dos termoplásticos convencionais. Entre elas, destaca-se o sistema epóxi, considerado o mais robusto para aplicações aeroespaciais.

Apesar de a constante dielétrica e a tangente de perda apresentarem degradação com o aumento da temperatura, esses problemas podem ser atenuados em classes especiais de poliéster. Contudo, tanto os epóxios quanto os poliésteres, em condições práticas, apresentam limite de operação próximo a 150 °C, o que restringe sua aplicação em determinados cenários (Kumar; Gupta, 2019).

Um dos sistemas mais recentes estudados para superar essas limitações é o das resinas de éster cianato, que curam por reação de ciclotrimerização de três moléculas de monômeros de cianato, formando policianurato com anel de triazina. Suas propriedades térmicas e dielétricas, comparadas a outros sistemas de resinas disponíveis na literatura, são determinantes para avaliar o desempenho de radomes fabricados a partir desses compósitos (Kumar; Gupta, 2019).

A resina epóxi, embora mais cara que outros sistemas, apresenta vantagens

significativas: propriedades físicas e de adesão superiores às do poliéster e do éster vinílico, resistência mecânica elevada, baixa contração e maior tolerância à degradação ambiental e à umidade. Por essas razões, é amplamente utilizada nas indústrias aeroespacial, automotiva e marítima. Entretanto, requer o uso de endurecedores para o processo de cura, demandando maior cuidado no manuseio. Ainda assim, devido às suas características, o epóxi é considerado uma das resinas mais adequadas para aplicações marítimas (Ramanamurthy; Krishna, 2016).

Apesar da relevância desses materiais, uma revisão bibliográfica detalhada evidencia a ausência de estudos sistemáticos sobre as propriedades mecânicas de compósitos termofixos. Esse cenário abre espaço para a investigação e fabricação de novos compósitos, empregando diferentes frações em peso de fibra de vidro, polietileno tereftalato (*polyethylene terephthalate* - PET) e materiais de enchimento em matrizes poliméricas. Esses novos compósitos têm sido avaliados quanto a propriedades físicas, mecânicas e térmicas, conforme normas ASTM. Os dados obtidos são de grande utilidade para tecnólogos de materiais, engenheiros mecânicos e de defesa, ao fornecer uma base para o desenvolvimento de materiais direcionados a aplicações específicas. Nesse sentido, estudos têm utilizado fibras de vidro e PET virgem em forma de manta tecida, tendo o epóxi como matriz, com laminados produzidos pela técnica de moldagem a vácuo (Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014).

A evolução dos polímeros termofixos, associada às fibras de vidro e a diferentes materiais de enchimento, tem promovido avanços expressivos em termos mecânicos, térmicos e tecnológicos. Esses materiais sintéticos, combinando características dos polímeros de alta resistência já existentes, consolidaram-se como um campo fértil de pesquisa. A incorporação de aditivos e cargas variadas tem ampliado as possibilidades de desempenho, oferecendo novas oportunidades para a fabricação de compósitos otimizados para aplicações críticas, como radomes de submarinos (Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014).

2.2.3 Núcleos

No caso dos radomes de submarinos, o núcleo estrutural é geralmente constituído por materiais de baixa constante dielétrica, como colmeias (fibra de vidro, alumínio e grafite) ou espumas (poliisocianato e núcleos termoformáveis), que conferem rigidez e resistência sem comprometer a transparência eletromagnética. Contudo, em aplicações subaquáticas, onde as pressões em grandes profundidades são extremamente elevadas, os núcleos convencionais de espuma podem ser insuficientes.

Nessas condições, diferentes tipos de madeira, também de baixa constante dielétrica, têm se mostrado alternativas mais adequadas, oferecendo maior resistência mecânica e capacidade de suportar cenários operacionais extremos (Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014; Waqas *et al.*, 2019).

Entre os núcleos de madeira mais estudados, destacam-se a balsa e a amoreira processada (*engineered mulberry*), ambos com espessura de 27 mm e fatores de segurança semelhantes. A balsa, considerada a madeira mais leve do mundo, apresenta densidade de 250 kg/m^3 e resistência à tração de 23,50 MPa. Já a amoreira processada, obtida a partir de pequenos galhos compactados, apresenta densidade de 600 kg/m^3 , resistência à tração de 646 MPa (muito superior). Outras alternativas incluem o bambu, com densidade de 742 kg/m^3 e resistência à tração de 128,53 MPa, e a Paulônia, com densidade de 280 kg/m^3 e resistência à tração de 49,10 MPa, apresentando melhor eficiência em termos de deformação. A amoreira pura possui densidade de 690 kg/m^3 e elevada resistência à tração (605 MPa), resultando em desempenho estrutural superior (Waqas *et al.*, 2019).

Entre os núcleos não madeireiros, destaca-se a espuma de policloreto de vinila (*polyvinyl chloride* - PVC), utilizada com 55 mm de espessura e densidade de 80 kg/m^3 . Apesar de sua baixa constante dielétrica, essa configuração apresenta fator de flambagem reduzido em relação a alternativas mais leves e rígidas. Independentemente do núcleo, estes podem ser associados a lâminas estruturais de polímeros reforçados com fibra de carbono (*carbon fiber reinforced polymer* - CFRP) ou polímeros reforçados com fibra de vidro (*glass fiber reinforced polymer* - GFRP). De maneira geral, configurações que utilizam CFRP demonstram desempenho superior, com maiores fatores de segurança, menores deformações e maior resistência à flambagem, quando comparadas às que utilizam GFRP (Waqas *et al.*, 2019).

2.3 Estruturas

Nas estruturas de radomes, os compósitos do tipo sanduíche podem adotar diferentes configurações construtivas conforme as demandas mecânicas do projeto. Entre as possibilidades mais usuais estão as paredes de camada única, de duas camadas, de três camadas, conhecidas como radomes do tipo A-sanduíche, e de cinco camadas, classificadas como radomes do tipo C-sanduíche, representadas na Figura 4. A seleção do número de camadas, bem como dos materiais empregados, é determinada pelos requisitos específicos de desempenho estrutural. A configuração mais simples é a parede monolítica, composta por um único laminado homogêneo (Özdemir *et al.*,

2020).

Radomes monolíticos se destacam pela leveza e pelo excelente desempenho elétrico quando as paredes são mantidas com pequena espessura; em contrapartida, a redução da espessura compromete a resistência mecânica. O aumento da espessura melhora a robustez, mas degrada o desempenho eletromagnético. Por isso, a configuração em sanduíche é amplamente adotada, pois permite conciliar elevada resistência mecânica com desempenho elétrico superior ao distribuir funções entre as “peles” e o núcleo (Özdemir *et al.*, 2020). No arranjo sanduíche, camadas finas e rígidas (peles) são coladas a um núcleo espesso e leve, garantindo transferência de carga e oferecendo, simultaneamente, alta relação resistência-peso e rigidez-peso, além de boa resistência à corrosão atributos especialmente relevantes em aplicações aeronáuticas e navais. Variantes usuais são as configurações A-sanduíche, C-sanduíche e multicamadas, que empregam materiais dielétricos distintos para combinar baixo peso e alta resistência mecânica (Özdemir *et al.*, 2020; Waqas *et al.*, 2019).

O A-sanduíche é formado por um núcleo (espuma ou colmeia) de baixa constante dielétrica posicionado entre dois laminados finos. Seu princípio de funcionamento é análogo ao do laminado sólido com espessura de meia onda: a espessura total é da ordem de $0,25\lambda$, pois os coeficientes de reflexão das peles têm mesma fase e amplitude. Assim, a viagem de ida e volta da reflexão na segunda pele soma $0,5\lambda$ e as reflexões, defasadas de 180° , se cancelam (Waqas *et al.*, 2019; Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014).

O C-sanduíche utiliza três peles e dois núcleos de espuma. As espessuras de cada núcleo e, se necessário das peles, podem ser ajustadas para otimizar o desempenho em radiofrequência (RF) nas faixas de interesse, resultando em múltiplas combinações construtivas que aliam bom desempenho eletromagnético e alta robustez mecânica. Em geral, o C-sanduíche oferece desempenho superior ao A-sanduíche, à custa de maior complexidade e, portanto, custos mais elevados de material e fabricação (Waqas *et al.*, 2019; Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014).

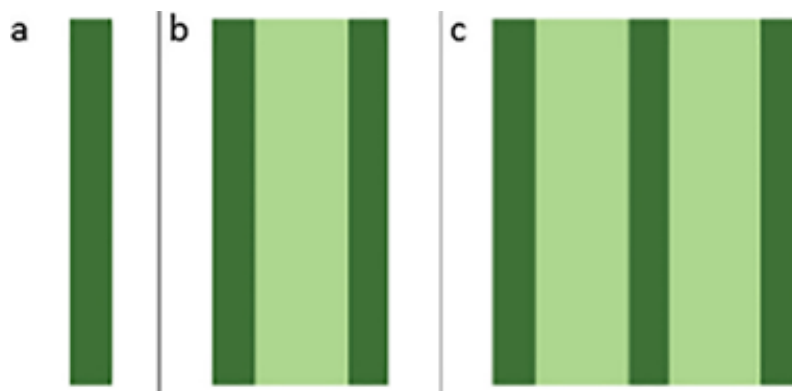
Além das arquiteturas sanduíche, há diretrizes eletromagnéticas clássicas que orientam a escolha de espessuras. Radomes “eletricamente finos” (espessura $< 0,1\lambda$) tendem a apresentar baixa perda e alta transmissão, pois as reflexões na interface espaço livre/dielétrico são compensadas por reflexões fora de fase no lado oposto do laminado. Contudo, essa solução praticamente não oferece isolamento térmico, sendo inadequada em ambientes com grandes amplitudes térmicas e exigência de controle de

temperatura (Waqas *et al.*, 2019; Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014).

Uma alternativa é o laminado sólido com espessura de meia onda: a onda percorre 180° , é refletida com deslocamento de fase de -180° e percorre mais 180° no retorno, perfazendo o cancelamento líquido de 180° . O mesmo laminado pode operar até aproximadamente 35 GHz quando a espessura efetiva alcança $0,5\lambda$ (Waqas *et al.*, 2019; Srinivasulu; Khan; Jaikrishna, 2014).

Por fim, configurações de banda larga são preferidas quando se requer operação em frequências mais elevadas e boa permeabilidade eletromagnética. Estudos indicam que a estrutura C-sanduiche costuma cobrir uma faixa mais ampla. Mantidas as mesmas metas mecânicas, uma construção em cinco camadas pode atingir espessura global menor do que uma de três camadas, favorecendo o desempenho eletromagnético sem sacrificar a robustez (Özdemir *et al.*, 2020).

Figura 4: Configurações de paredes de radomes: (a) monolítica; (b) A-sanduiche; (c) multicamadas ou C-sanduiche.



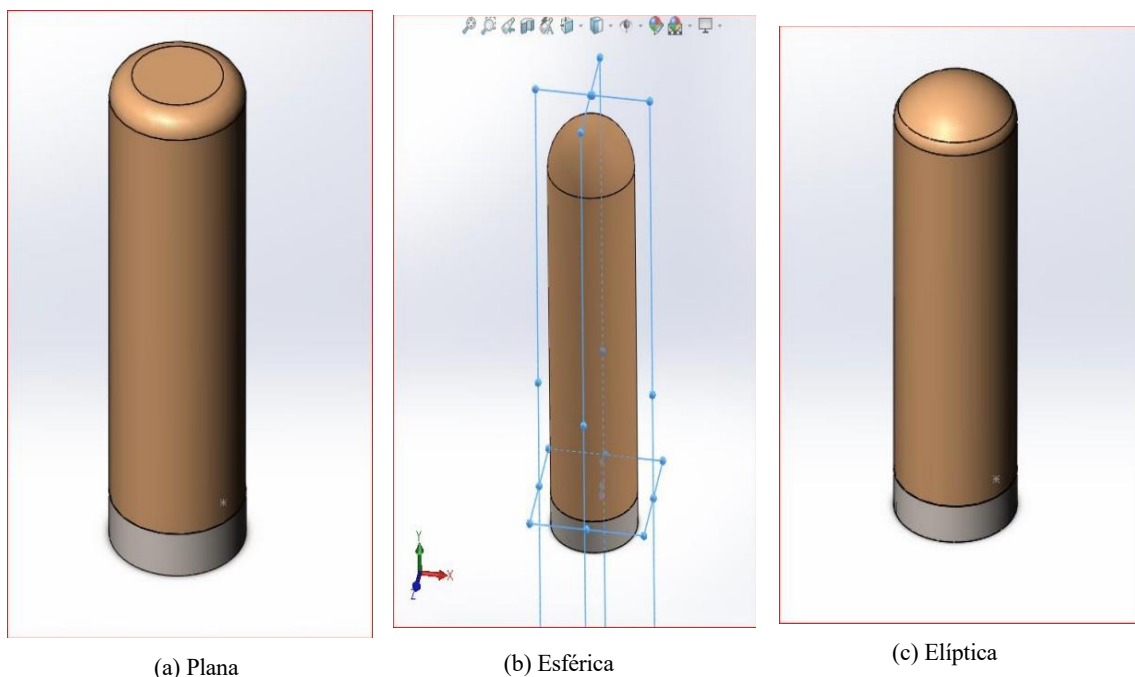
Fonte: Özdemir *et al.* (2020).

2.4 Formas

A geometria dos radomes pode variar conforme a estrutura da antena, sendo comumente configurada como um cilindro longo com extremidade em formato de “cabeça”. Em aplicações de alta pressão, como apresentado na Figura 5, três formatos padrão são geralmente considerados: plano, esférico e elíptico. A cabeça plana, embora apresente fabricação simples e boa transmissão de ondas de RF com baixa perda e desvio, exige maior espessura para suportar as cargas aplicadas. A cabeça elíptica, por sua vez, destaca-se pelo caráter econômico, já que sua altura corresponde a um quarto do diâmetro, sendo amplamente empregada em vasos de pressão e tanques de alta pressão. Já a cabeça esférica é reconhecida como a forma ideal, pois proporciona distribuição uniforme da pressão em toda a superfície, tendo o raio equivalente ao da

parte cilíndrica do radome (Saikrishna; Anasuya, 2019).

Figura 5: Formatos padrão de cabeças de radomes sob alta pressão: (a) plano; (b) esférico; (c) elíptico.



Fonte: Adaptado de Saikrishna e Anasuya (2019).

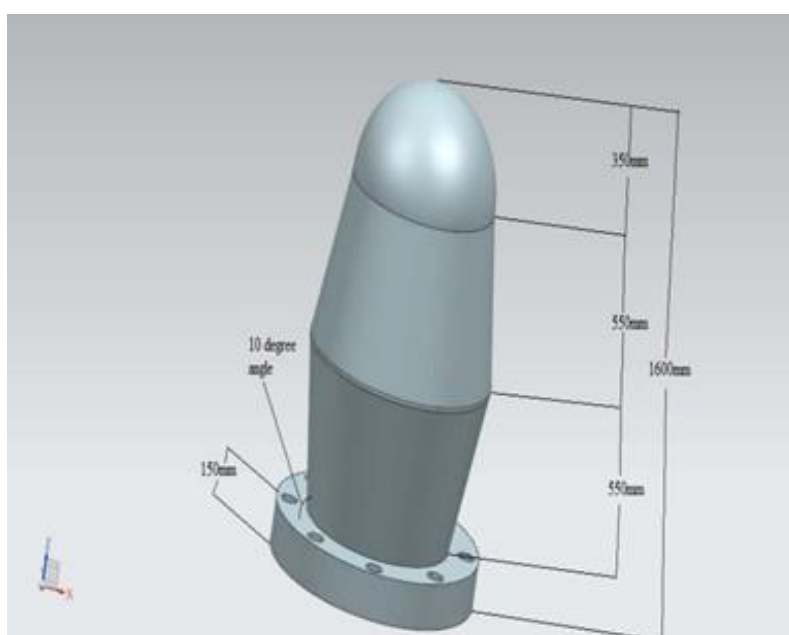
Resultados de simulações estruturais aplicando cargas às três geometrias evidenciaram diferenças significativas de desempenho. Tanto a cabeça plana quanto a elíptica apresentaram maiores deformações sob carregamento, o que compromete sua eficiência em aplicações críticas. Apesar de a cabeça elíptica oferecer maior resistência à pressão interna em comparação à externa, tal característica não compensa as limitações estruturais observadas (Saikrishna; Anasuya, 2019).

Sob a ótica elétrica, a cabeça esférica revelou-se a configuração mais adequada, já que seus ângulos de incidência reduzidos minimizam perdas de RF e a degradação do desempenho eletromagnético. Dessa forma, ao aliar vantagens estruturais e propriedades superiores em radiofrequência, a cabeça esférica se apresenta como a solução mais eficiente e equilibrada para projetos de radomes submetidos a condições de alta pressão e exigências rigorosas de desempenho em RF (Saikrishna; Anasuya, 2019).

Um estudo recente propôs um modelo inovador de radome para submarinos, como apresentado na Figura 6, desenvolvido a partir de simulações numéricas. Inicialmente, foram avaliadas diferentes configurações de paredes sanduíche (A-sanduíche, C-sanduíche e multicamadas) em termos de perda por inserção, seguida da análise do ganho de antena monopolo VHF operando a 59 MHz sob radomes cilíndricos

tradicionais em formato de barril e sob o novo modelo, construído com pele de *S-glass* e núcleo de epóxi com fibra de vidro. Por fim, aplicou-se um teste de pressão hidrostática, variando de 50 a 200 bar, para verificar a resistência à tensão e o fator de deformação. Os resultados mostraram que, enquanto o modelo tradicional suporta até 50 bar (aproximadamente 490 m de profundidade), a configuração inovadora apresentou menor deformação e maior resistência, suportando pressões de até 200 bar. Dessa forma, o radome proposto demonstrou ser uma alternativa mais eficiente e segura para operações em profundidades de colapso elevadas, atendendo às exigências de submarinos modernos de ataque nuclear (Tahseen; Yang; Uddin, 2020).

Figura 6: Estrutura de radome em formato inovador.



Fonte: Tahseen, Yang e Uddin (2020).

2.5 Métodos de Fabricação dos Radomes

A escolha do método de fabricação de radomes depende de fatores como os requisitos de desempenho e os materiais de construção empregados. Entre as principais técnicas estão a moldagem a vácuo, a moldagem em autoclave e o enrolamento filamentar, cada uma com características específicas que influenciam tanto o comportamento mecânico quanto as propriedades eletromagnéticas da estrutura (Ashok; Dala, 2016).

O enrolamento filamentar (*filament winding*) destaca-se por permitir o uso de equipamentos automatizados e, sobretudo, pelo controle preciso da razão resina/vidro, garantindo uma constante dielétrica uniforme em todo o radome. Essa uniformidade facilita o processo de usinagem até dimensões físicas específicas, reduzindo a

necessidade de ajustes durante as etapas finais, além de diminuir o tempo gasto com testes elétricos e correções. Outro diferencial desse processo é a possibilidade de orientar as fibras nas direções principais de carga, oferecendo flexibilidade estrutural não alcançada com reforços em tecido. Os plásticos reforçados com fibra de vidro produzidos por esse método apresentam constantes dielétricas da ordem de 3,5 a 4,5 na frequência de banda X (Ashok; Dala, 2016).

A moldagem a vácuo (*vacuum molding*) foi uma das primeiras técnicas aplicadas à fabricação de radomes em plástico reforçado com fibra de vidro. Nela, tecidos secos de vidro são impregnados com resina líquida durante a laminação, que é então selada com um saco plástico conectado a uma fonte de vácuo para remoção do ar. A espessura final e o teor de resina do laminado são definidos principalmente pela operação manual de compressão, realizada com ferramentas de borracha ou plástico macio. O processo é atrativo pelo baixo custo e pela possibilidade de obtenção de laminados de alta qualidade quando executado por trabalhadores habilitados (Ashok; Dala, 2016).

A moldagem em autoclave (*autoclave molding*) segue princípios semelhantes à moldagem a vácuo, mas é voltada especialmente para materiais pré-impregnados (*pre-preg*), que não permitem a remoção de ar por compressão. Nesse caso, são utilizados filmes plásticos perfurados ou tecidos de vidro tratados, acompanhados por camadas absorventes que eliminam o excesso de resina e produtos de reação durante a cura. As autoclaves empregadas nesse processo geralmente operam com pressões entre 100 e 200 psi e temperaturas de até 500 °F, adequadas para resinas como epóxi e dialilftalato. Já sistemas mais complexos, como silicones, fenólicos, poliamidas e polibenzidazóis, costumam ser moldados em pressões próximas a 200 psi. A aplicação de pressões mais elevadas proporciona compósitos de melhor qualidade, assegura maior confiabilidade ao processo e garante reprodutibilidade de peça para peça (Ashok; Dala, 2016).

2.6 Métodos de Análise dos Radomes

A análise por elementos finitos (*Finite Element Analysis* — FEA) constitui uma das principais ferramentas para avaliação do desempenho estrutural e eletromecânico de radomes. No estudo de Waqas *et al.* (2019), o *ANSYS Workbench* foi utilizado para analisar um radome de submarino, a partir da criação de um protótipo geométrico baseado em seu esboço. Após a definição das dimensões e geometrias, foram selecionados os componentes adequados e gerada a malha com discretização de 50 mm. As propriedades dos materiais foram atribuídas conforme a aplicação

subaquática, e diferentes cargas e condições de contorno foram aplicadas no pré-processamento. O modelo inicial foi desenvolvido no módulo *ANSYS Composite PrePost* (ACP), transferido para o módulo de análise estática a fim de determinar o fator de segurança frente à falha do compósito e, posteriormente, analisado no módulo de flambagem por autovalores para obtenção do fator de flambagem. As lâminas compósitas foram modeladas com propriedades ortotrópicas, enquanto os núcleos de PVC e madeira de amoreira foram considerados isotrópicos. O modelo foi fixado na base em todos os graus de liberdade e submetido a uma pressão externa de 5,25 MPa (Waqas *et al.*, 2019).

Em outro trabalho, Britto e Kumar (2016) empregaram a integração entre ferramentas *Computer-Aided Design* (CAD) e *Computer-Aided Engineering* (CAE) para o estudo de radomes sanduíche multicamadas de polímero reforçado com fibra. O projeto foi desenvolvido no *SolidWorks*, utilizando epóxi com *E-glass*, epóxi com fibra de carbono e sua combinação como materiais de referência, com o objetivo de avaliar parâmetros estruturais e eletromagnéticos. O modelo gerado em CAD foi importado para o *ANSYS*, onde foram realizadas análises estruturais estáticas e modais.

O *SolidWorks*, desenvolvido pela *Dassault Systèmes* (França), é um *software* de projeto assistido por computador amplamente empregado para modelagem de estruturas complexas. No caso dos radomes, o programa permite criar modelos com dimensões de referência extraídas da literatura, ajustáveis conforme o tamanho da antena, suas características e as condições específicas de aplicação e instalação (Britto; Kumar, 2016).

2.7 Interação Radar-Radome

A interação entre o radar e o radome ocorre a partir do momento em que a onda eletromagnética emitida pela antena atravessa o material dielétrico que compõe a parede do radome. Durante esse processo, a propagação da onda sofre fenômenos de reflexão, refração, absorção e atenuação, os quais podem alterar o desempenho eletromagnético do sistema. A natureza e a intensidade dessas alterações dependem de alguns fatores como a constante dielétrica relativa (ϵ_r) e a tangente de perda (δ) do material, a espessura da parede, o ângulo de incidência da onda, a frequência de operação e o formato geométrico do radome (Kozakoff, 2010; Kumar; Mohammed; Peake, 2020).

Uma das causas da degradação eletromagnética é o descasamento de impedância

entre o ar e o material dielétrico do radome. Esse desajuste gera reflexões parciais nas interfaces ar–radome e radome–ar, resultando em múltiplas reflexões internas e perdas de transmissão. Essas perdas se manifestam como perda por inserção, representando a redução da potência transmitida pela antena devido à absorção e dissipação de energia dentro das camadas dielétricas. O coeficiente de reflexão e o coeficiente de transmissão, que descrevem a proporção de energia refletida e transmitida, variam conforme a permissividade e a condutividade do material. Assim, materiais com baixa constante dielétrica e baixa tangente de perda são preferidos, pois mantêm alta transparência eletromagnética e minimizam o impacto sobre o ganho e o padrão de radiação da antena (Kumar; Mohammed; Peake, 2020).

De acordo com Kumar, Mohammed e Peake (2020), outro fator é a espessura da parede do radome, que influencia diretamente o comportamento das ondas refletidas e transmitidas. Quando o radome é projetado com uma espessura equivalente a um múltiplo de meio comprimento de onda no material, ocorre o cancelamento de reflexões fora de fase, tornando o radome praticamente transparente ao sinal na frequência de operação. A espessura ideal (t) pode ser determinada pela relação:

$$t = \frac{n \lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

em que λ_0 é o comprimento de onda no vácuo, ϵ_r é a constante dielétrica relativa do material e n é um número inteiro que representa o múltiplo de meia onda desejado. Essa formulação, conhecida como *half-wave radome principle*, garante que as ondas refletidas nas interfaces ar–radome e radome–ar se cancelem mutuamente, minimizando perdas por reflexão.

Entretanto, como também é tratado por Kumar, Mohammed e Peake (2020), desvios dessa espessura ideal ou variações de frequência podem causar interferências destrutivas, resultando em ondulações, nulos no diagrama de radiação e perda de eficiência na detecção de alvos. O mesmo princípio se aplica à distância entre a antena e a parede interna do radome, que deve ser ajustada para que as ondas refletidas retornem em fase com as transmitidas, minimizando o efeito de eco interno e reforçando a coerência do sinal. Essa distância ótima (d) pode ser expressa como:

$$d = \frac{m \lambda_0}{2} \quad (2)$$

onde m é um número inteiro. O ajuste dessa separação assegura que as reflexões internas do radome interfiram construtivamente com o campo direto irradiado pela antena, evitando distorções no padrão de radiação.

Além das perdas diretas, a presença do radome pode introduzir erros angulares e distorções no feixe irradiado. O fenômeno conhecido como erro de linha de visada ou *Boresight Error* representa o desvio do ângulo de chegada ou transmissão de um sinal em relação ao seu verdadeiro eixo, decorrente da refração da onda ao atravessar o radome. Sua variação em função do ângulo de varredura da antena é definida como inclinação do erro de linha de visada ou *Boresight Error Slope*. Esses efeitos, resultantes da não uniformidade do campo dentro do radome e de assimetrias geométricas, podem causar perda de precisão na direção de apontamento e degradação no desempenho de guiagem (Kozakoff, 2010).

Outros efeitos indesejados incluem o aumento dos lóbulos secundários, a despolarização e a elevação da relação de onda estacionária de tensão (*Voltage Standing Wave Ratio* – VSWR). O aumento do SLL ocorre devido à distorção e aos efeitos de transmissão da parede à medida que a frente de onda se propaga através do radome. A despolarização ocorre quando parte da energia da polarização principal é convertida na polarização oposta, devido à curvatura da parede e às diferenças nos coeficientes de transmissão das componentes ortogonais do campo elétrico. Já o aumento do VSWR está relacionado às reflexões internas do radome, podendo introduzir perdas adicionais e instabilidade de ganho em altas potências de RF (Kozakoff, 2010).

Em síntese, a interação radar–radome constitui um fenômeno eletromagnético complexo, no qual propriedades do material, geometria estrutural e condições operacionais determinam o equilíbrio entre transparência eletromagnética e resistência mecânica. O domínio desses parâmetros é essencial para o projeto de radomes em diferentes plataformas aéreas, terrestres, navais ou subaquáticas, garantindo que a proteção física da antena não comprometa sua eficiência na transmissão e recepção de sinais (Kozakoff, 2010; Kumar; Mohammed; Peake, 2020).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se em uma revisão bibliográfica abrangente sobre os principais aspectos relacionados aos radomes, focando em radomes de submarinos, contemplando a evolução histórica, os materiais empregados, as estruturas e formatos mais recorrentes, bem como os métodos de fabricação e de

análise descritos na literatura especializada. Foram consultadas publicações técnicas, artigos científicos e relatórios de referência, a fim de reunir informações que possibilitassem a construção de uma visão consolidada sobre o tema.

A partir desse levantamento, procedeu-se à sistematização dos dados em categorias temáticas, destacando as características mais relevantes de cada abordagem. A análise buscou evidenciar as vantagens e limitações dos diferentes materiais e processos, considerando as demandas específicas de aplicações navais submersas. Com base nessa comparação, foram identificadas tendências tecnológicas e avaliadas possíveis adaptações aplicáveis à realidade da Marinha do Brasil.

4 SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

A simulação por elementos finitos foi conduzida com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural de diferentes materiais empregados na construção de radomes de submarinos, quando submetidos a condições de pressão hidrostática equivalentes às encontradas em ambiente subaquático de operação. Essa etapa visa comparar o desempenho mecânico dos materiais compósitos *H-Glass/Epóxi*, *E-Glass/Epóxi* e Fibra de Carbono/Epóxi frente à ação de um carregamento uniforme de 5 MPa, representativo de uma profundidade aproximada de 500 metros.

O método dos elementos finitos (MEF) foi adotado por sua capacidade de discretizar geometrias complexas em elementos menores, permitindo uma análise detalhada da distribuição de tensões, deformações e deslocamentos sob diferentes condições de contorno. Essa abordagem torna-se especialmente útil na avaliação de estruturas compostas, anisotrópicas e com empilhamentos laminares, como o modelo de radome utilizado.

Para o desenvolvimento da modelagem e análise foi utilizado o *ANSYS Workbench*, um software de simulações que utiliza o MEF para resolver numericamente problemas de engenharia envolvendo mecânica dos sólidos, fluidos, transferência de calor, acústica e eletromagnetismo, integrando módulos específicos que permitem a criação de modelos geométricos, definição de propriedades materiais, geração de malha, aplicação de cargas e interpretação dos resultados.

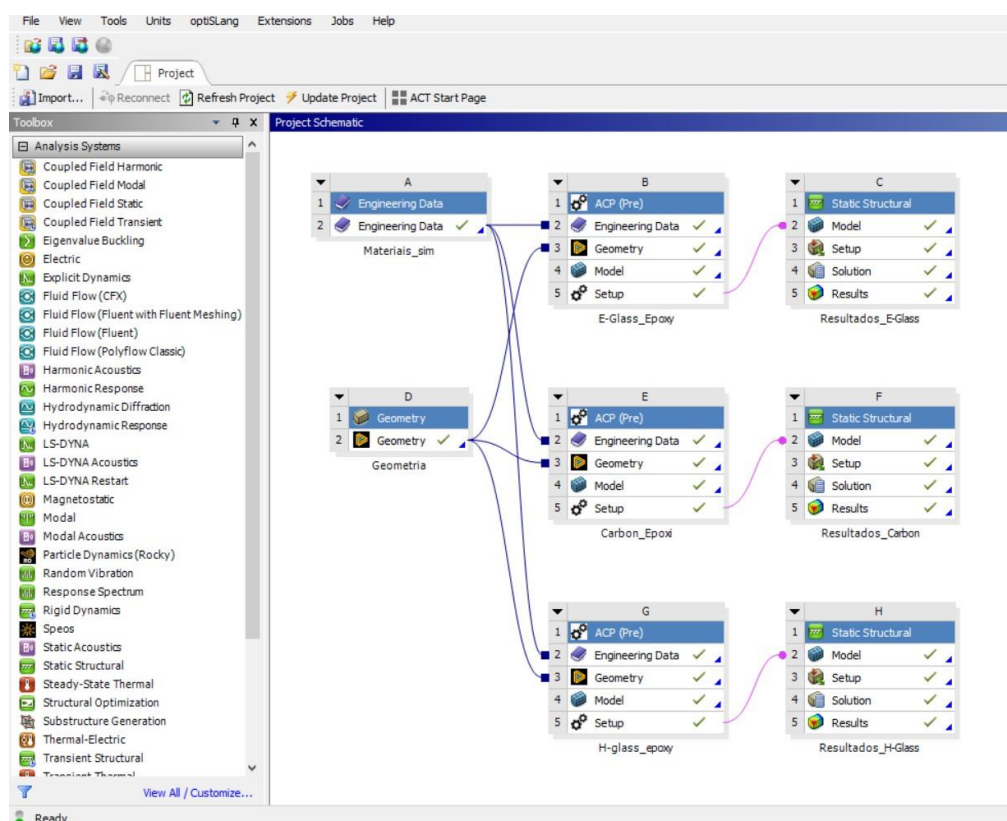
No presente estudo, como aparece na Figura 7, foram empregados dois módulos principais do *ANSYS Workbench*:

- O módulo *ANSYS Composite PrepPost* (ACP), responsável pela definição das propriedades laminares e sequência de empilhamento das camadas do compósito,

bem como pela geração das direções de fibras e parâmetros anisotrópicos de cada material.

- O módulo *Static Structural*, utilizado para a aplicação das condições de contorno e carregamento, resolução numérica do problema e obtenção dos resultados de *Total Deformation*, *Equivalent Elastic Strain* e *Equivalent Stress*.

Figura 7: Imagem do ANSYS com os Modelos Empregados.



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1 Materiais

A seleção dos materiais empregados na simulação foi orientada por critérios estruturais e eletromagnéticos, buscando reproduzir de forma realista o comportamento dos compósitos utilizados em radomes de aplicação subaquática. A escolha do *H-Glass/Epóxi*, *E-Glass/Epóxi* e Fibra de Carbono/Epóxi fundamenta-se em sua ampla utilização na indústria naval, bem como na disponibilidade de dados experimentais na literatura especializada. Esses materiais representam três faixas distintas de desempenho, Fibra de Carbono/Epóxi, de alta rigidez e resistência à tração; o *E-Glass/Epóxi*, de boas propriedades mecânicas e dielétricas; e o *H-Glass/Epóxi*, de baixa densidade e elevada flexibilidade, com excelente transparência eletromagnética. Assim, o conjunto selecionado permite comparar a variação do módulo elástico, a

distribuição de tensões e deformações no radome, fornecendo subsídios para a definição do material mais adequado à aplicação em submarinos operando sob altas pressões hidrostáticas.

As propriedades mecânicas adotadas para cada compósito utilizado na simulação foram extraídas de estudos consolidados na literatura, garantindo a consistência e a confiabilidade científica dos parâmetros empregados. O *H-Glass/Epóxi* apresenta comportamento isotrópico, com propriedades obtidas de Reddy, Anuradha e Nikhil (2015), enquanto os compósitos *E-Glass/Epóxi* e Fibra de Carbono/Epóxi foram considerados ortotrópicos, conforme os dados reportados por Waqas *et al.* (2019). A Tabela 3 apresenta de forma comparativa as propriedades mecânicas e físicas de cada material, utilizadas como base para a simulação no *ANSYS Workbench*.

Tabela 3: Propriedades mecânicas e físicas dos materiais utilizados na simulação.

Propriedade	H-Glass /Epóxi	E-Glass /Epóxi	Carbon /Epoxi
Tipo de comportamento	Isotrópico	Ortotrópico	Ortotrópico
Módulo de Young (MPa) – X	17 620	45 000	121 000
Módulo de Young (MPa) – Y	–	10 000	8 600
Módulo de Young (MPa) – Z	–	10 000	8 600
Razão de Poisson ν_{XY}	0,30	0,30	0,27
Razão de Poisson ν_{YZ}	–	0,30	0,27
Razão de Poisson ν_{XZ}	–	0,40	0,40
Módulo de cisalhamento G_{XY} (MPa)	6 776,9	5 000	4 700
Módulo de cisalhamento G_{YZ} (MPa)	–	5 000	4 700
Módulo de cisalhamento G_{XZ} (MPa)	–	3 846,2	3 100
Módulo volumétrico (MPa)	14 683	–	–
Resistência à tração (MPa)	196,4	1 100	2 231
Resistência à compressão (MPa)	0,0002325	–	–
Densidade (kg/mm ³)	$1,6 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$

Fonte: Adaptado de Reddy, Anuradha e Nikhil (2015) e Waqas *et al.* (2019).

4.1.1 *E-Glass*

O *E-glass* foi escolhido por reunir as propriedades essenciais exigidas para operação em ambiente submarino, como elevada transparência eletromagnética, baixa constante dielétrica, boa estabilidade dimensional e excelente resistência mecânica. Além disso, o *E-glass* apresenta vantagens relevantes para aplicações navais, incluindo alta resistência à corrosão, baixo custo, boa rigidez, isolamento elétrico e desempenho consistente sob diferentes condições ambientais, que justificam o seu amplo emprego na indústria marítima. (Waqas *et al.*, 2019; Ramanamurthy; Krishna, 2016).

4.1.2 *H-Glass*

O *H-glass* foi selecionado por apresentar um conjunto de propriedades que o tornam especialmente adequado para radomes submetidos a condições severas, como as encontradas em submarinos. Ele destaca-se por sua estrutura tubular oca, que reduz significativamente a densidade do material sem comprometer a resistência estrutural. Além do baixo peso, apresenta alta resistência específica, maior elasticidade, superior resistência à compressão e desempenho aprimorado em propriedade dielétrica, fatores fundamentais para manter a integridade mecânica e a transparência eletromagnética do radome (Ramanamurthy; Krishna, 2016).

4.1.3 Fibra de Carbono

Como comparativo, a fibra de carbono apresenta elevado módulo de elasticidade, alta resistência à tração e excelente estabilidade dimensional. Tais características garantem desempenho estrutural superior, com menores deformações sob altas pressões e melhor resistência à fadiga. No entanto, o material possui custo mais elevado e propriedades dielétricas inferiores às dos vidros, limitando sua transparência eletromagnética e tornando-o mais adequado a aplicações em que o requisito estrutural prevalece sobre a transparência de RF (Britto; Kumar, 2016).

4.1.4 Resina Epóxi

A resina epóxi, embora mais cara que outros sistemas, apresenta vantagens significativas: propriedades físicas e de adesão superiores às do poliéster e do éster vinílico, resistência mecânica elevada, baixa contração e maior tolerância à degradação ambiental e à umidade. Por essas razões, é amplamente utilizada nas indústrias aeroespacial, automotiva e marítima. Entretanto, requer o uso de endurecedores para o processo de cura, demandando maior cuidado no manuseio. Ainda assim, devido às suas características, o epóxi é considerado uma das resinas mais adequadas para aplicações marítimas (Ramanamurthy; Krishna, 2016).

4.2 ANSYS Composite PrepPost

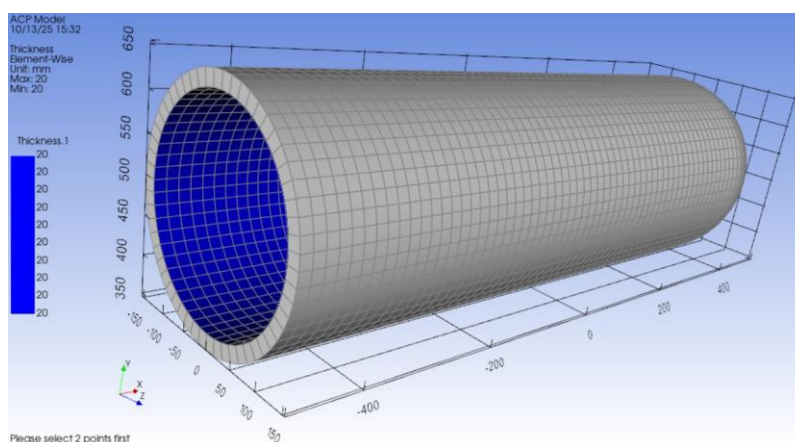
O módulo ACP foi empregado na modelagem e análise estrutural do radome, possibilitando a construção de um modelo tridimensional realista e a avaliação do comportamento mecânico dos compósitos sob pressão hidrostática. O *ANSYS Composite PrepPost* é uma ferramenta voltada especificamente para a simulação de materiais compósitos, permitindo a definição precisa de camadas (*plies*), espessuras,

ângulos de orientação das fibras e propriedades anisotrópicas, além de gerar dados de saída compatíveis com módulos de análise estática e de flambagem. Sua integração com o *Workbench* assegura o mapeamento automático das propriedades ortotrópicas e isotrópicas dos materiais, facilitando a transferência de dados entre os ambientes de pré e pós-processamento.

No presente estudo, o modelo do radome foi construído com base nas dimensões reais de estruturas navais: altura de 1000 mm, diâmetro de 268 mm na seção cilíndrica e raio de 134 mm na tampa esférica. O laminado foi composto por 25 camadas, cada uma contendo quatro lâminas de 0,2 mm, resultando em uma espessura total de 20 mm. As propriedades mecânicas de cada material foram previamente definidas no banco de dados do ACP, conforme os valores apresentados na Tabela 3.

A geração da malha foi realizada utilizando as seguintes configurações: preferência física (*Physics Preference*) definida como *Mechanical*, ordem dos elementos (*Element Order*) igual a *Quadratic* e tamanho médio dos elementos de 15 mm. A discretização resultou em 11 424 nós e 3 799 elementos, garantindo equilíbrio entre precisão e tempo de processamento. A malha gerada é apresentada na Figura 8.

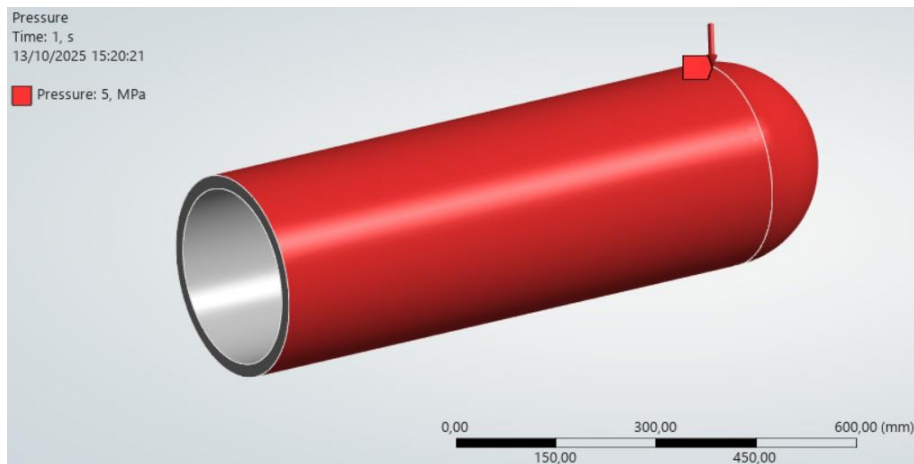
Figura 8: Malha gerada para o modelo tridimensional do radome.



Fonte: Elaboração própria (2025).

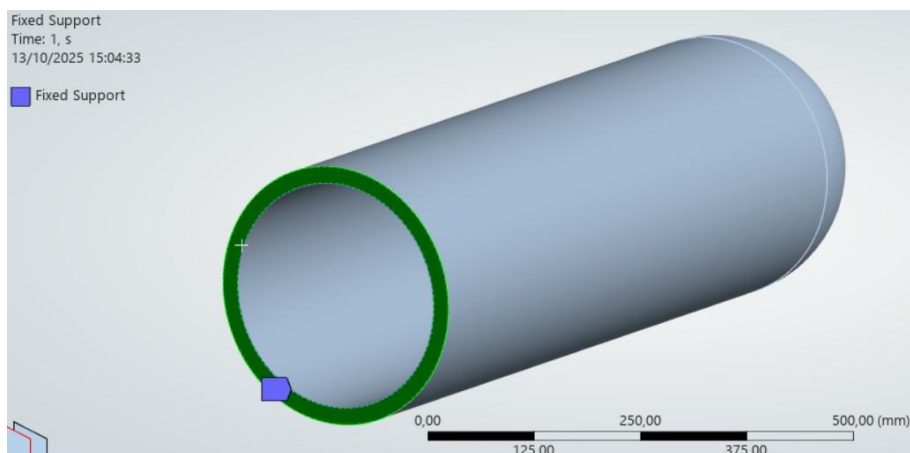
As condições de contorno adotadas estão ilustradas nas Figura 9 e Figura 10. A base do radome foi totalmente restringida em todos os graus de liberdade (*Fixed Support*), simulando a fixação da estrutura ao mastro do submarino. Sobre a superfície externa foi aplicada uma pressão uniforme de 5 MPa, correspondente às condições de operação em grandes profundidades. Essa pressão equivale aproximadamente a 500 metros de coluna d'água, considerando a densidade média da água do mar em 1 025 kg/m³.

Figura 9: Aplicação da pressão de 5 MPa sobre a superfície externa do radome.



Fonte: Elaboração própria (2025).

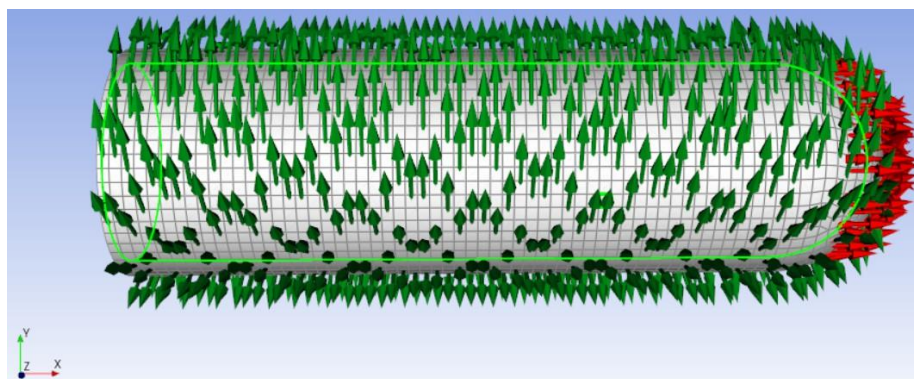
Figura 10: Condição de contorno do tipo *Fixed Support* aplicada à base do radome.



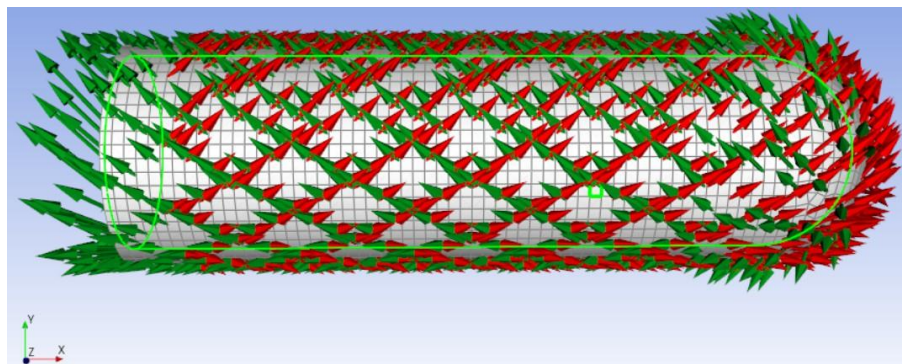
Fonte: Elaboração própria (2025).

A definição dos vetores de orientação das fibras foi realizada de forma que as direções principais de carga coincidisse com o eixo longitudinal do radome. As fibras foram dispostas nas direções de 0° , -45° , 45° e 90° , de modo a equilibrar as propriedades estruturais e garantir um comportamento mecânico simétrico sob carregamento hidrostático. A Figura 11 apresenta a distribuição dos vetores de orientação no laminado. Esse processo é essencial no ACP, pois a direção das fibras exerce influência direta sobre o desempenho mecânico e modo de falha dos compósitos.

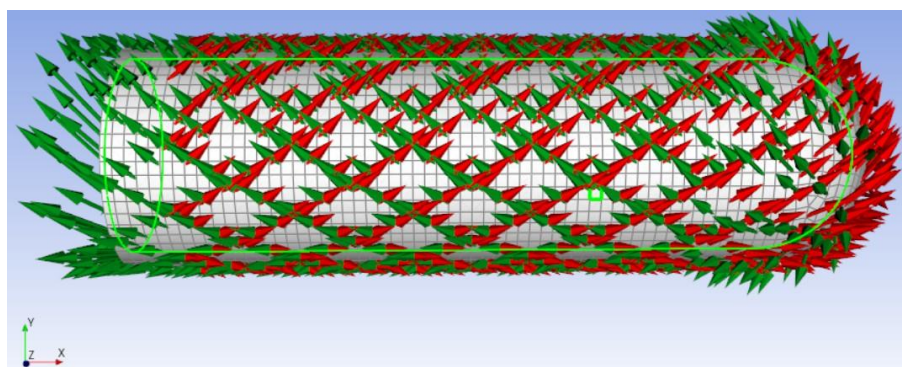
Figura 11: Orientações das fibras no laminado definidas no módulo ACP do *ANSYS Workbench*.



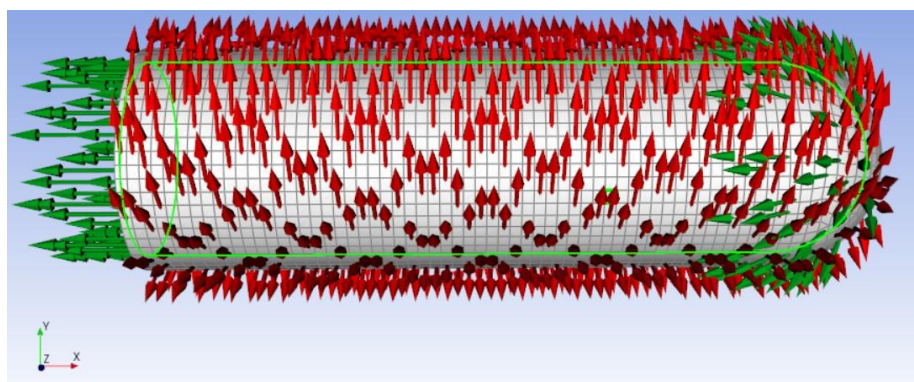
(a) Orientação 0°



(b) Orientação -45°



(c) Orientação 45°



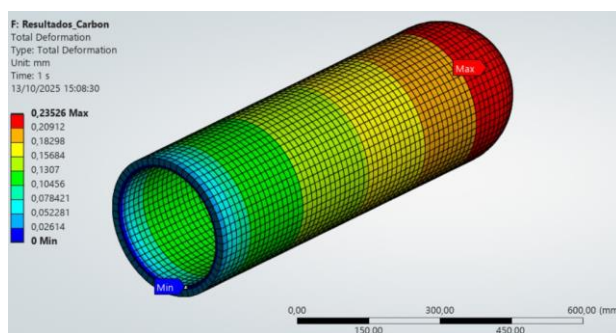
(d) Orientação 90°

Fonte: Elaboração própria (2025).

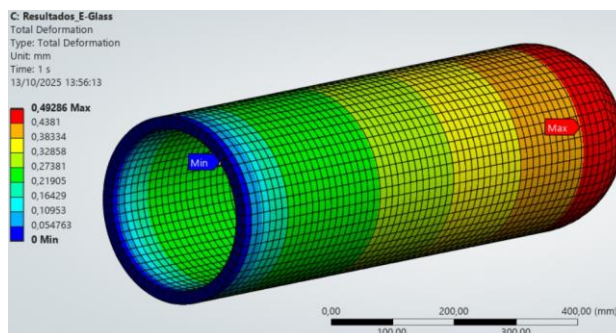
4.3 Apresentação dos Resultados

A partir das simulações realizadas no *ANSYS Workbench*, foi possível obter os principais parâmetros estruturais de interesse para a avaliação comparativa dos materiais selecionados. Os resultados estão apresentados nas Figuras 12, 13 e 14, que ilustram, respectivamente, a distribuição da deformação total (*Total Deformation*), da deformação elástica equivalente (*Equivalent Elastic Strain*) e da tensão equivalente (*Equivalent Stress*) para cada compósito analisado.

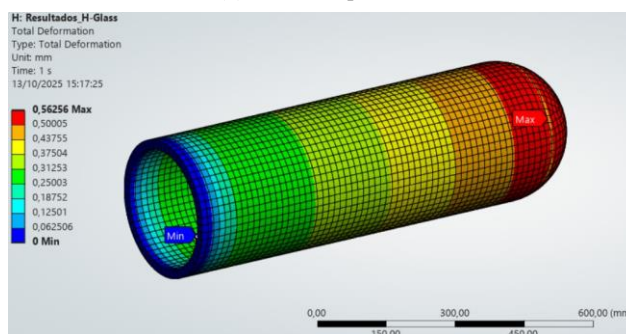
Figura 12: Distribuição da deformação total.



(a) Carbono/Epóxi



(b) E-Glass/Epóxi



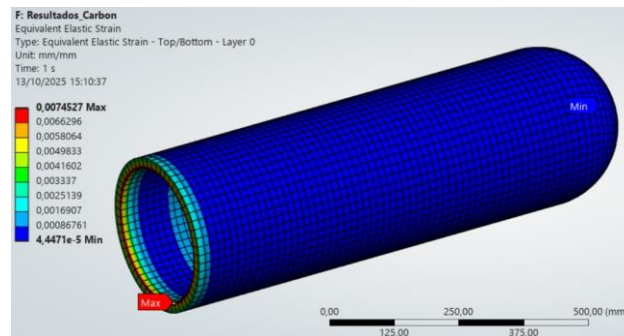
(c) H-Glass/Epóxi

Fonte: Elaboração própria (2025).

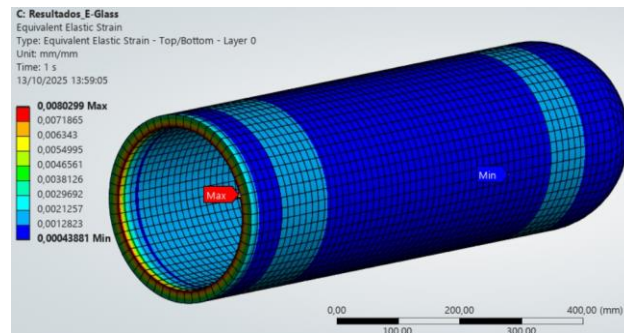
Observa-se que o compósito Carbono/Epóxi apresentou a menor deformação total, com valor máximo de aproximadamente 0,235 mm, evidenciando sua elevada rigidez estrutural. O material *E-Glass*/Epóxi apresentou deformação intermediária, de 0,493 mm, enquanto o *H-Glass*/Epóxi apresentou o maior valor, de 0,563 mm. Esses

resultados estão coerentes com o módulo de elasticidade dos materiais (Tabela 3), confirmando que o aumento da rigidez está diretamente associado à redução das deformações sob a mesma carga aplicada.

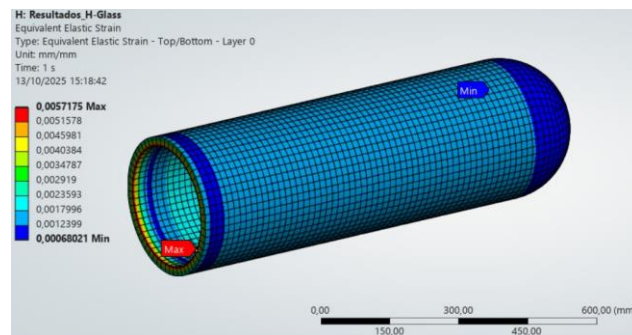
Figura 13: Distribuição da deformação elástica equivalente.



(a) Carbono/Epóxi



(b) *E-Glass*/Epóxi

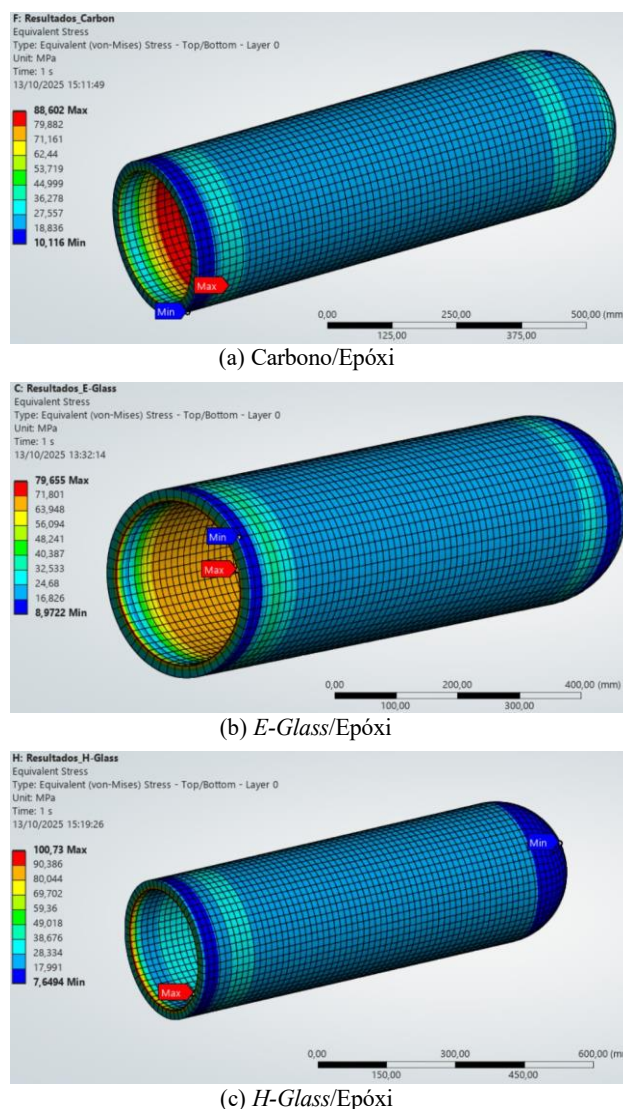


(c) *H-Glass*/Epóxi

Fonte: Elaboração própria (2025).

Quanto à deformação elástica equivalente, os resultados obtidos foram de 0,00745 mm/mm para o Carbono/Epóxi, 0,00803 mm/mm para o *E-Glass*/Epóxi e 0,00572 mm/mm para o *H-Glass*/Epóxi. Esses valores indicam que, embora o *H-Glass*/Epóxi apresente menor rigidez global, ele apresentou uma boa distribuição de deformações, o que reflete maior capacidade de absorção de energia elástica antes da falha.

Figura 14: Distribuição da tensão equivalente.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Em relação às tensões equivalentes, o compósito *H-Glass/Epóxi* apresentou a maior tensão (100,73MPa), seguido pelo Carbono/Epóxi (88,60MPa) e pelo *E-Glass/Epóxi* (79,66MPa). O valor mais elevado obtido para o *H-Glass/Epóxi* está associado à sua menor rigidez, o que resulta em maiores concentrações de tensões locais, porém dentro de limites aceitáveis para aplicações em estruturas submetidas a pressões hidrostáticas.

4.4 Discussão

Quanto aos dados mecânicos obtidos e apresentados na Tabela 4, os resultados numéricos indicam que o Carbono/Epóxi apresenta a melhor rigidez estrutural e a menor deformação sob pressão, o que o torna o material mais eficiente para radomes submetidos a elevadas pressões hidrostáticas. No entanto, o *H-Glass/Epóxi* destacou-se

pela combinação de baixo peso e boa capacidade de absorção de tensões, características desejáveis em estruturas sujeitas a ciclos de carregamento repetitivo e impactos. Assim, ambos os materiais mostram-se tecnicamente viáveis, devendo a escolha final depender do balanço entre requisitos estruturais, desempenho eletromagnético e custo de fabricação.

Tabela 4: Resultados obtidos nas simulações de elementos finitos.

Propriedade Avaliada	<i>H-Glass/Epóxi</i>	<i>E-Glass/ Epóxi</i>	Carbono/ Epóxi
Deformação total (mm)	0,56256	0,49286	0,23526
Deformação elástica equivalente (mm/mm)	0,0057175	0,0080299	0,0074527
Tensão equivalente (MPa)	100,73	79,655	88,602

Fonte: Elaboração própria (2025).

O comportamento eletromagnético dos materiais simulados demonstra diferenças significativas em termos de constante dielétrica e tangente de perda, parâmetros diretamente relacionados à transparência às ondas de radar. De acordo com Reddy, Anuradha e Nikhil (2015), o compósito *E-Glass/Epóxi* apresenta constante dielétrica média de $\epsilon_r = 4,06$ e tangente de perda de $\delta = 0,02$, enquanto o *H-Glass/Epóxi* possui valores inferiores, com $\epsilon_r = 2,9$ e $\delta = 0,01$. Essa diferença implica que o *H-Glass/Epóxi* possui melhor desempenho na transmissão de ondas eletromagnéticas, uma vez que materiais com menor constante dielétrica e menores perdas dielétricas reduzem a reflexão e a absorção interna. Em contrapartida, o compósito Carbon/Epóxi, conforme observado por Britto e Kumar (2016), apresenta propriedades dielétricas mais degradantes que as do *E-Glass/Epóxi*, caracterizando-se por uma constante dielétrica mais elevada e uma tangente de perda superior, o que reduz significativamente sua transparência eletromagnética. Essa limitação decorre da natureza condutiva das fibras de carbono, que introduzem perdas adicionais e atenuam as ondas incidentes, tornando o material menos indicado para aplicações em radomes.

5 CONCLUSÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso apresentou uma análise aprofundada sobre o desenvolvimento, os materiais, as tecnologias e as aplicações de radomes, com ênfase nas exigências impostas pelos ambientes navais submarinos e nas possibilidades de aplicação dessas soluções no contexto da Marinha do Brasil. A partir do estudo histórico e técnico realizado, verificou-se que a evolução dos radomes acompanhou o

avanço dos sistemas de radar e das demandas operacionais militares, passando de estruturas rudimentares em madeira e Plexiglas durante a Segunda Guerra Mundial para sofisticados compósitos de fibras e resinas de alto desempenho, capazes de aliar transparência eletromagnética, resistência mecânica e durabilidade em condições extremas.

Os resultados das simulações numéricas realizadas com o software *ANSYS Workbench* demonstraram a relevância da escolha criteriosa dos materiais na construção de radomes de alta performance. De forma geral, considerando o equilíbrio entre propriedades eletromagnéticas e mecânicas, o compósito *H-Glass/Epoxy* se mostra o material mais adequado para a construção de radomes submarinos. Sua menor constante dielétrica e baixa tangente de perda proporcionam elevada transparência eletromagnética, essencial para o correto funcionamento de antenas e sensores sob o domo. Além disso, o *H-Glass/Epóxi* mantém boa resistência estrutural e estabilidade frente à pressão hidrostática simulada de 5 MPa, conforme verificado nas análises mecânicas. O *E-Glass/Epóxi*, embora apresente desempenho estrutural ligeiramente superior, mostra-se menos eficiente do ponto de vista eletromagnético. Já o Carbono/Epóxi, apesar de sua rigidez elevada, é desfavorável para aplicações em radomes devido à sua natureza condutiva. Assim, a combinação de baixo ϵ , reduzido δ e boa integridade mecânica posiciona o *H-Glass/Epóxi* como o compósito mais equilibrado e tecnicamente viável para aplicações navais de alta pressão e alta frequência, assim como concluído nos trabalhos de Reddy, Anuradha e Nikhil (2015) e Ramanamurthy e Krishna (2016).

Do ponto de vista estrutural, a adoção de configurações do tipo sanduíche, associando peles de compósitos reforçados e núcleos leves, mostrou-se a solução mais adequada para suportar as cargas mecânicas sem comprometer a integridade eletromagnética. A análise das formas geométricas reforçou que, em radomes de formato cilíndrico, a cabeça esférica é a mais eficiente, por distribuir uniformemente as tensões e minimizar perdas de RF, sendo preferível a geometrias planas ou elípticas em condições de alta pressão.

O estudo também abordou a interação radar–radome, destacando que a constante dielétrica e a tangente de perda são parâmetros decisivos para evitar reflexões, absorções e distorções de fase ou polarização. Essa compreensão é essencial para assegurar que o radome atue como uma “janela eletromagnética”, preservando o desempenho do radar embarcado e garantindo precisão nas medições e detecções.

Conclui-se, portanto, que o emprego de compósitos de *H-Glass/Epóxi* em estruturas

C- sanduíche ou multicamadas, fabricadas por técnicas avançadas como enrolamento filamentar ou moldagem em autoclave, representa a alternativa tecnicamente mais promissora para futuros radomes submarinos da Marinha do Brasil. Além de atender aos requisitos mecânicos e dielétricos, tais soluções favorecem a redução de peso, a resistência à corrosão e a confiabilidade em longo prazo.

5.1 Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos e nas lacunas identificadas ao longo desta pesquisa, recomenda-se a continuidade do estudo em três eixos complementares: simulação integrada, inovação em materiais e prospecção tecnológica.

Em primeiro lugar, propõe-se o desenvolvimento de um novo modelo de radome configurado em uma estrutura tipo A-sanduíche ou C-sanduíche, combinando fibras de vidro, carbono ou aramida, em matriz Epóxi. Essa combinação permitiria explorar o potencial de radomes híbridos quanto a suas propriedades mecânicas e dielétricas, maximizando o desempenho global da estrutura. O novo projeto deverá incluir simulações tanto eletromagnéticas quanto mecânicas. Essa abordagem multivariada proporcionará uma visão mais realista sobre o comportamento do radome em operação, contribuindo para um projeto otimizado em desempenho.

Em segundo plano, destaca-se a importância de realizar uma pesquisa de mercado técnico-industrial, voltada à identificação de fornecedores nacionais e internacionais capazes de atender às especificações da Marinha do Brasil. Esse levantamento permitirá direcionar aquisições futuras, orientando o desenvolvimento de parcerias estratégicas com centros de pesquisa, universidades e empresas que dominem tecnologias de fabricação de compósitos de alta performance e processos de moldagem avançada. Tal ação é fundamental para reduzir a dependência externa e promover a soberania tecnológica em sistemas sensíveis da defesa.

Por fim, recomenda-se a investigação de materiais com absorção seletiva em frequência (FSA – *Frequency Selective Absorption*), capazes de atenuar seletivamente determinadas faixas do espectro eletromagnético sem comprometer a transparência nas bandas operacionais do radar. Esses materiais podem contribuir não apenas para o aprimoramento furtivo dos sistemas navais, mas também para o controle da assinatura eletromagnética de submarinos e embarcações de superfície, ampliando a eficiência do conjunto radar–radome–plataforma dentro da concepção moderna de Guerra Eletrônica.

Em síntese, os trabalhos futuros deverão buscar a integração entre estruturas

híbridas, simulações multifísicas e estratégias de aquisição orientadas por mercado, consolidando uma base científica e tecnológica capaz de sustentar o desenvolvimento de radomes navais de próxima geração, adequados às exigências operacionais e estratégicas da Marinha do Brasil.

Referências

ANDRADE, F. d. O. **Caracterização de compósitos dielétricos utilizados em radomes de banda larga**. outubro 2022. Dissertação de Mestrado, outubro 2022.

ASHOK, G.; DALA, R. Design and analysis of air borne radome. **International Journal of Research in Design and Analysis of Air Borne Radome**, 2016.

BRITTO, C.; KUMAR, S. Design and study of different parameters of a submarine radome by using ansys. **International Journal of Advanced Scientific Technologies in Engineering and Management Sciences**, 2016. Disponível em: <www.ijastemDiffere>.

HEYDARI, M. S. *et al.* Various types of ceramics used in radome: A review. **Scientia Iranica B**, 2016. Disponível em: <www.scientiairanica.com>.

KOZAKOFF, D. J. **Analysis of Radome-Enclosed Antennas**. 2. ed. Norwood, MA: Artech House, 2010.

KUMAR, A. M. V.; SUSHMA, P.; SWAMY, G. S. Structural analysis of a submarine radome by changing different design parameters. **Online International Interdisciplinary Research Journal**, v. 7, 2017. Bi-Monthly.

KUMAR, C.; MOHAMMED, H. U. R.; PEAKE, G. **mmWave Radar Radome Design Guide**. Dallas, 2020. Disponível em: <https://www.ti.com>. Acesso em: 14 out. 2025.

KUMAR, S.; GUPTA, P. A review on ceramic and polymer materials for radome applications. In: **IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)**. India: IEEE, 2019.

RAMANAMURTHY, V.; KRISHNA, L. Design of high pressure radome with uwb frequency coverage for submarine communications. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, v. 7, 2016.

REDDY, P. E. K.; ANURADHA, D.; NIKHIL, S. A study and modeling of high pressure radome with uwb frequency coverage in submarine communications. **Research Inventy: International Journal of Engineering and Science**, Research Inventy, s.l., v. 5, n. 7, p. 49–62, julho 2015. Disponível em: <http://www.researchinventy.com>.

SAIKRISHNA, M.; ANASUYA, Y. Experimental investigation of composite materials and validation using fea for submarine radome design. **International Journal of Research Available**, v. 6, ago. 2019.

SANDEEP, C. S. *et al.* Design and analysis of submarine radome. In: **AIP Conference Proceedings**. [S.l.]: American Institute of Physics Inc., 2017.

SHAVIT, R. **Radome Electromagnetic Theory and Design**. [S.l.]: John Wiley & Sons / IEEE Press, 2018.

SOUMYA, V. M. *et al.* Design considerations of radomes: A review. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, v. 8, n. 3, 2017.

SRINIVASULU, N. V.; KHAN, S.; JAIKRISHNA, S. Design and analysis of submarine radome. In: **Lecture Notes in Mechanical Engineering**. [S.l.]: Springer Heidelberg, 2014. v. 15, p. 11–26.

TAHSEEN, H. U.; YANG, L.; UDDIN, S. Submarine antenna performance with novel shaped sandwich-wall radome. In: **2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)**. [S.l.]: IEEE, 2020.

WAQAS, H. M. *et al.* Conceptual design of composite sandwich structure submarine radome. **Materials**, v. 12, n. 12, 2019.

ÖZDEMİR, B. *et al.* Comparison of radome sandwich composite structures with finite element method. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier Ltd, 2020.