

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

JOÃO GUILHERME SOUSA E SIMAS

ANÁLISE DA INVISIBILIDADE À RADAR DE FILMES FINOS METÁLICOS  
DEPOSITADOS SOBRE FIBRA DE VIDRO PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA  
NAVAL

Joinville

2016

JOÃO GUILHERME SOUSA E SIMAS

ANÁLISE DA INVISIBILIDADE À RADAR DE FILMES FINOS METÁLICOS  
DEPOSITADOS SOBRE FIBRA DE VIDRO PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA  
NAVAL

Trabalho de Conclusão de curso apresentado  
como requisito parcial para a obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Naval no  
curso de Engenharia Naval da Universidade  
Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.

Orientadora: Dra. Viviane Lilian Soethe

Co-Orientador: Dr. Rafael Galina Dellatorre

Joinville

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Simas, João Guilherme Sousa e  
Análise da invisibilidade a radar de filmes finos  
metálicos depositados sobre fibra de vidro para aplicação  
na indústria naval / João Guilherme Sousa e Simas ;  
orientadora, Viviane Lilian Soethe ; coorientador, Rafael  
Galina Delatorre. - Joinville, SC, 2016.  
80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.  
Graduação em Engenharia Naval.

Inclui referências

1. Engenharia Naval. 2. Tecnologia furtiva. 3.  
Materiais absorvedores de radiação eletromagnética. 4.  
Filmes finos metálicos. 5. Compósitos. I. Soethe, Viviane  
Lilian. II. Delatorre, Rafael Galina. III. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval.  
IV. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, Nivaldo e Solange Simas, e ao meu avô Sálvio Simas.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, aos meus pais, Nivaldo e Solange e aos meus irmãos, Maria Clara, Andre Luis e Andrea, por iluminarem meus caminhos incondicionalmente.

A minha namorada, Eduarda, por ser uma fonte constante de inspiração, amor e paz ao longo de todo o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao meu avô Sálvio Simas, por ter dedicado a vida à construção de embarcações e ao mar, inspirando boa parte da família a seguir caminhos semelhantes, inclusive a minha escolha pela Engenharia Naval.

A minha orientadora e amiga Viviane, cuja calma, competência e dedicação mesmo nos momentos mais difíceis, foram fatores determinantes para a conclusão dessa etapa da minha vida.

Ao meu co-orientador Rafael, por sempre estar disposto a discutir ideias e a me auxiliar no andamento desse trabalho.

Aos amigos que me acompanharam durante todo o percurso da graduação, tornando minha vida mais feliz.

Aos colegas dos projetos de extensão Babitonga de 2010 a 2011 e Sambaqui, de 2011 a 2013.

Ao professor Júlio César Sagás, do Laboratório de Plasma do Departamento de Física da UDESC, pela disponibilidade e dedicação que foram essenciais para a obtenção das amostras do presente trabalho.

Ao Departamento de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), pela disposição dos laboratórios, principalmente ao professor Adriano Luiz de Paula, pelo auxílio na condução dos ensaios de absorção eletromagnética em guia de onda.

Ao professor Gabriel Benedet Dutra, pela disponibilização do laboratório de fabricação de modelos da UFSC e por ter sido sempre solícito às minhas dúvidas quanto ao processo de laminação de compósitos.

Aos demais colegas, professores e servidores da Engenharia Naval e do campus da UFSC em Joinville, que tanto me ensinaram.

“O que fazia de Sócrates tão sábio era o fato de continuar fazendo perguntas e de sempre estar disposto a debater suas ideias. A vida, declarava ele, só vale a pena ser vivida quando pensamos no que estamos fazendo. Uma existência sem análise é adequada para o gado, mas não para os seres humanos”.

**Nigel Warburton**

## RESUMO

A utilização de tecnologias furtivas em embarcações vem se tornando um fator vital no sucesso de operações navais de vigilância. Essas tecnologias visam tornar veículos menos visíveis (idealmente invisíveis) a mecanismos de detecção tais como, radares, sonares, câmeras de captação em infravermelho e visual. No Brasil, enxerga-se em embarcações furtivas uma potencial ferramenta para o melhor controle de fronteiras marítimas, e da exploração de petróleo e pesca nas zonas de economia exclusiva (ZEE), no entanto, é necessário que a tecnologia utilizada para conferir a furtividade seja desenvolvida no país, visto que há pouco compartilhamento das soluções utilizadas mundo afora, devido ao caráter estratégico do assunto. Publicações nacionais na área de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) indicam que filmes finos metálicos com espessuras nanométricas podem apresentar altos índices de absorção de radiação na faixa de frequências utilizada em radares. Esses materiais apresentam grande potencial de utilização com fins furtivos, uma vez que ao absorver a radiação emitida por um radar, o material se parecerá invisível ao mecanismo de identificação. Nesse contexto o presente trabalho busca testar a invisibilidade a radar de um compósito de fibra de vidro com deposição de filmes finos de titânio na sua fase reforço, visto que tais compósitos são amplamente utilizados na construção de embarcações. Para isso, foram confeccionados compósitos utilizando resina epóxi e tecidos de fibra de vidro que receberam deposição de filmes finos de titânio através da técnica de *Triodo Magnetron Sputtering*. Foram obtidos filmes de titânio com espessuras de 7 nm, 14 nm e 21 nm, e as amostras foram configuradas variando a espessura dos filmes e o número de camadas de fibra no compósito. As amostras foram testadas quanto à absorção eletromagnética na faixa de 8 a 12 GHz, e o resultados obtidos mostram que a aplicação dos filmes nos compósitos altera significativamente os níveis de absorção eletromagnética do material. Foram observados índices médios de absorção de até 50% da radiação incidente, enquanto compósitos que utilizaram fibras sem os filmes apresentaram índices na ordem de 10%. Esses resultados indicam que o material apresenta grande potencial de uso na construção de embarcações furtivas.

**Palavras-chave:** Tecnologia Furtiva. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética. Filmes Finos Metálicos. Compósitos.

## ABSTRACT

The use of stealth boats is becoming a vital factor in the success of naval surveillance operations. These technologies aim to make vehicles less visible (ideally invisible) to detection mechanisms such as radar, sonar, infrared cameras and visual. In Brazil, the use of stealth boats could be a potential tool for better control of maritime borders, oil exploration and fishing in the exclusive economic zones (EEZ), however, the technology used to confer stealth must be developed in the country, since there is few sharing of solutions used worldwide, due to the strategic nature of the subject. National publications involving radar absorbing materials (RAM) indicate that metal thin films with nanometric thickness can show high levels of radiation absorption in the frequency range used in radars. Such materials have great potential for use with stealth purposes, considering that by absorbing the radiation emitted by radar, the material will appear invisible to the identification mechanism. In this context the present study seeks to test the invisibility to radar of a fiberglass composite with thin titanium films deposition in its reinforcement phase, knowing that these composites are widely used in boatbuilding. To achieve the objective, composite samples were fabricated using epoxy resin and glass fiber woven that received the deposition of titanium thins films using the Triode Magnetron Sputtering technique. The titanium films were obtained with thicknesses of 7 nm, 14 nm and 21 nm, and the samples were set up by varying the film thickness and the number of layers of fibers in the composite. The samples had their electromagnetic absorption tested in the range of 8 to 12 GHz, and the results showed that the application of films in the composite had significantly altered the levels of electromagnetic absorption of the material. Were observed average rates of 50% absorption of incident radiation in the composites made using fibers with titanium films deposition, while composites containing fibers without the films showed average rates around 10%. These results indicate that the material has great potential for use in the construction of stealth boats.

**Keywords:** Stealth Technology. Radar Absorbing Materials. Metallic Thin Films. Patrol Boats. Composites.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Intervalo de frequências eletromagnéticas utilizadas por sistemas de identificação.....	12
Figura 2 – Representação do Espectro Eletromagnético .....	15
Figura 3 – Exemplo de camuflagem por ilusão de contorno .....	17
Figura 4 – Comparação de imagem captada em banda de olho nu e com câmera térmica portátil na faixa de frequência de infravermelho .....	18
Figura 5 – Princípio da reflexão utilizado em aparelhos de RADAR .....	20
Figura 6 – Exemplo de um MARE dielétrico piramidal. ....	25
Figura 7 – Exemplo de uma folha de absorvedor magnético comercial. ....	26
Figura 8 – Evolução da geometria de embarcações, visando a redução da RCS .....	28
Figura 9 – Imagem ilustrativa de embarcação furtiva Sea Shadow .....	29
Figura 10 – Imagem ilustrativa de uma corveta classe Visby da marinha da Suécia.....	30
Figura 11 – Seção transversal de um compósito de resina epoxy reforçada por fibra de carbono. ....	34
Figura 12 – Embarcação de recreio construída com polímero reforçado com fibra de vidro. ....	36
Figura 13 – Detalhe da malha do tecido de fibra de vidro utilizado na confecção das amostras. ....	38
Figura 14 – Metodologia utilizada para fabricação das amostras .....	41
Figura 15 – Esquema da cinética das partículas: A) Sputtering convencional e; B) Magnetron Sputtering .....	42
Figura 16 – Esquema do aprisionamento de elétrons nos processos de Magnetron Sputtering (MS) e; Triodo Magnetron Sputtering (TMS) .....	43
Figura 17 – Triodo Magnetron Sputtering da UDESC. A) Tampa da câmara; B) Câmara. ....	44
Figura 18 – Amostra de tecido de fibra de vidro no interior do equipamento de TMS .....	45
Figura 19 – Esquema ilustrando a sequência do processo de laminação manual de um compósito utilizando três camadas de fibra de vidro. ....	47
Figura 20 – Amostras durante o processo de laminação .....	48
Figura 21 – Ensaio de resistividade elétrica. A) Equipamento; B) Conexão. ....	49
Figura 22 – Esquema ilustrativo dos parâmetros S, obtidos no ensaio de guia de onda .....	51

Figura 23 – Equipamento de caracterização eletromagnética por guia de onda. A) Analisador vetorial de espectro evidenciando o aparato experimental utilizado nas medidas; B) Guia de onda com amostra fixada; C) Disposição da amostra no guia de onda. ....	51
Figura 24 – Imagem de MEV de amostra de fibra de vidro com deposição de Ti, com aumento de 32x.....	54
Figura 25 - Imagem de MEV de amostra de fibra de vidro com deposição de Ti, com aumento de 1000X.....	54
Figura 26 - Imagem de MEV de amostra de fibra de vidro com deposição de Ti, com aumento de: A) 5000x e; B) 15000x. ....	55
Figura 27 - Imagem de MEV de amostra de fibra de vidro com deposição de Ti, com aumento de 37000x.....	56
Figura 28 - Análise do comportamento elétrico dos tecidos de fibra de vidro com e sem filme de Ti .....	57
Figura 29 – Trama isolada da malha de fibra de vidro depositada com Ti. ....	58
Figura 30 – Curvas de absorção eletromagnética na face frontal dos compósitos .....	60
Figura 31 – Curvas de absorção eletromagnética no verso dos compósitos .....	60
Figura 32 – Comparação das curvas de absorção de filmes de 15 nm de Ti depositados sobre: A) Fibra de vidro posteriormente laminada com resina epóxi e; B) Polímero .....	63
Figura 33 – Comparação da absorção de diferentes espessuras de filmes de Ti em compósitos com mesmo número de camadas de fibra de vidro. A) 1 camada, frente; B) 2 camadas, frente; C) 1 camada, verso; D) 2 camadas, verso. ....	64
Figura 34 – Relação entre absorção média dos compósitos de uma camada e a espessura dos filmes de Ti .....	65
Figura 35 – Relação entre absorção média dos compósitos de duas camadas e a espessura dos filmes de Ti .....	66
Figura 36 – Relação entre absorção média dos compósitos de três camadas e a espessura dos filmes de Ti .....	67
Figura 37 – Comparativo entre as relações de absorção média e espessura de filmes dos compósitos com uma, duas e três camadas.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Profundidade de penetração de metais em função da frequência de onda incidente. ....	33
Tabela 2 – Características do processo de cura da resina.....	39
Tabela 3 – Propriedades da resina e endurecedor antes da cura.....	40
Tabela 4 – Propriedades do sistema resina-endurecedor após a cura.....	40
Tabela 5 – Parâmetros de deposição de Ti por TMS utilizado no trabalho.....	45
Tabela 6 – Espessura dos filmes de Ti obtidos em função do tempo de deposição. ....	53
Tabela 7 – Nome e especificações das amostras dos compósitos .....	59
Tabela 8 – Dados das curvas de absorção eletromagnéticas dos compósitos .....	62
Tabela 9 – Diferença relativa à absorção eletromagnética na face frontal e no verso dos compósitos obtidos. ....	69

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1. OBJETIVOS .....	13
<b>1.1.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>13</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1. MÉTODOS PARA REDUÇÃO DA DETECÇÃO DE EMBARCAÇÕES.....	14
<b>2.1.1. Redução da Assinatura Acústica de Embarcações.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2. Camuflagem Visual de Embarcações .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.3. Redução da Assinatura Infravermelho/Térmica.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.4. Redução da Assinatura RADAR.....</b>	<b>19</b>
2.2. MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....	22
<b>2.2.1. Princípios de Funcionamento de MARE.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2. Absorvedores Dielétricos .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.3. Absorvedores Magnéticos.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.4. MARE na Indústria Naval .....</b>	<b>27</b>
2.3. FILMES FINOS.....	30
<b>2.3.1. Métodos de Obtenção de Filmes Finos .....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.2. Filmes Finos Absorvedores de Radiação Eletromagnética .....</b>	<b>32</b>
2.4. MATERIAIS COMPÓSITOS .....	33
<b>2.4.1. Materiais Compósitos na Indústria Naval .....</b>	<b>35</b>
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
3.1. MATERIAIS.....	37
<b>3.1.1. Fibra de Vidro .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.2. Resina Epóxi .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.3. Filmes Finos de Titânio.....</b>	<b>40</b>
3.2. MÉTODOS .....	41
<b>3.2.1. Deposição de Titânio por Triodo Magnetron Sputtering.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.2. Perfilometria .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.3. Fabricação dos Compósitos .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.4. Microscopia Eletrônica .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.5. Resistividade .....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.6. Caracterização por Guia de Onda.....</b>	<b>50</b>

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>52</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESPESSURA DOS FILMES .....	52
4.2. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA.....	53
4.3. CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA.....	56
4.4. CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DOS COMPÓSITOS .....	58
<b>4.4.1. Avaliação da influência da espessura dos filmes e do número de camadas de fibra de vidro no índice de absorção eletromagnética dos compósitos.....</b>	<b>63</b>
<b>4.4.2. Comparação da energia absorvida pela frente e pelo verso dos compósitos obtidos .....</b>	<b>68</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	73
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Tecnologia furtiva, ou *Stealth*, se refere à área da tecnologia que desenvolve técnicas para tornar aviões, navios e mísseis menos visíveis (idealmente invisíveis) a mecanismos de detecção tais como, radares, sonares, câmeras de captação em infravermelho e visual (BAGUDAI, 2013).

No âmbito naval, embarcações que utilizam desse tipo de tecnologia têm assumido papel cada vez mais vital no sucesso de operações de vigilância, o que explica o fato de países como Suécia, Noruega e Estados Unidos utilizarem tais veículos para controle de fronteiras, pirataria e combate desde a década de 1980 (LAVERS, 2012; BERGIN, BATEEMAN, 1999)

No Brasil, a utilização de embarcações furtivas poderia contribuir para um melhor controle da exploração das riquezas, como petróleo e pescados contidos nas enormes áreas marítimas nacionais, além do monitoramento de fronteiras marítimas, fundamentais para a manutenção da soberania nacional (MOURA, 2009; CHAGAS ET. AL, 2015; LEWIS, 2015). No entanto, Simões (2005) afirma que, por serem consideradas estratégicas, tais tecnologias, em sua maioria, são restritas aos países nos quais foram desenvolvidas. Nesse contexto, a utilização de embarcações furtivas no Brasil está atrelada ao desenvolvimento de tecnologias nacionais, razão essa, que motiva a pesquisa do presente trabalho.

As técnicas utilizadas para reduzir a detecção de embarcações giram em torno de soluções geométricas e da utilização de materiais que absorvam o sinal proveniente de um sistema de identificação. Para cada um desses sistemas, soluções específicas são necessárias devido as diferentes faixas de frequência utilizadas.

O volume de publicações que tratam de tecnologias furtivas aplicadas ao setor naval no Brasil é escasso, porém, no que tange invisibilidade a radar, existem diversos trabalhos nacionais na área de tecnologia de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE), como Nohara (2003), Simões (2005), Folgueras e Rezende (2011), Soethe et al (2008), Soethe et al (2011) e Soethe (2009). Esses trabalhos, apesar de focados nos mecanismos físicos da absorção de energia pelo material, desenvolvem métodos e materiais que poderão ter uma futura aplicação em veículos furtivos.

Soethe (2009) observou que materiais metálicos como titânio, alumínio e cobre, quando dispostos em camadas com espessura na ordem de dezenas de nanômetros sobre um substrato polimérico contínuo, adquirem a propriedade de absorver radiação eletromagnética na faixa de frequência de 8 a 12 GHz. Tal faixa de frequência é conhecida como banda X, e é usualmente utilizada em aparelhos de radar, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Intervalo de frequências eletromagnéticas utilizadas por sistemas de identificação.

DESIGNAÇÃO DA BANDA	FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz)	USO GERAL
HF	3 – 30	Sistemas de vigilância aérea de altíssimo alcance
VHF	30 – 300	
UHF	300 – 1.000	
L	1.000 – 2.000	Sistemas de vigilância aérea de longo alcance, controle de rotas de tráfego aéreo
S	2.000 – 4.000	Sistemas de vigilância aérea de médio alcance, controle próximo de tráfego aéreo, radares meteorológicos de longo alcance
C	4.000 – 8.000	Monitoramento a longas distâncias, radares meteorológicos aero-embarcados
X	8.000 – 12.000	Monitoramento a curtas distâncias, sistemas guias de mísseis, radar marinho, sistemas de interceptação de aeronaves
K <sub>u</sub>	12.000 – 18.000	Mapeamento de alta resolução, altimetria de satélites
K	18.000 – 27.000	Pouco utilizado devido à interferência com o vapor de água
K <sub>a</sub>	27.000 – 40.000	Mapeamento de altíssima resolução, sistemas de vigilância de aeroportos
Milimétrica	40.000 – 300.000	Experimental

Fonte: NOHARA, 2003, p. 5

Quadros (2014) explica que a absorção eletromagnética de filmes finos metálicos está associada a mecanismos quânticos de perda, que fazem com que a radiação incidente seja armazenada e dissipada pela superfície do filme em forma de calor. Tal comportamento é dependente de propriedades como permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ) do material que constitui o filme.

Os filmes obtidos por Soethe (2009) apresentam grande potencial de uso com o intuito de reduzir a visibilidade de embarcações a aparelhos de radar, pois esses aparelhos identificam alvos através da leitura de um sinal que é emitido, refletido no alvo, e recebido novamente pelo equipamento. Caso o sinal seja absorvido pela estrutura da embarcação, ele não retornará ao radar e, portanto, a embarcação não será detectada.

De modo a testar a efetividade da absorção eletromagnética dos filmes finos apresentados por Soethe (2009) em um material amplamente utilizado na fabricação de embarcações de alta velocidade, o presente trabalho propõe a deposição de filmes metálicos sobre substrato de fibra de vidro. Tais substratos, após receberem os filmes, são laminados com resina polimérica, transformados em placas de compósitos e testados quanto sua absorção eletromagnética na faixa de 8 a 12 GHz.

A configuração escolhida, depositando os filmes na fase reforço do compósito, visa testar a efetividade do material como absorvedor sem a necessidade de revestimentos externos.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Estudar o potencial de compósitos de fibras de vidro revestidas com filmes finos metálicos, como MARE, para aplicação na indústria naval.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Verificar a importância deste tema no segmento naval.
- Obter filmes finos de titânio sob um substrato de fibra de vidro, utilizando a técnica de Triodo Magnetron Sputtering.
- Elaborar compósitos com diferentes números de camadas utilizando as fibras de vidro revestidas com filmes finos.
- Caracterizar a absorção da radiação eletromagnética das amostras por guia de onda.
- Realizar análises microscópicas e elétricas das amostras a fim de entender a influência dos filmes finos nas propriedades intrínsecas do compósito a base de fibra de vidro.



## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os conceitos fundamentais do tema da presente pesquisa, incluindo a contextualização do assunto no âmbito de engenharia naval.

### 2.1. MÉTODOS PARA REDUÇÃO DA DETECÇÃO DE EMBARCAÇÕES

Tecnologias utilizadas para reduzir o potencial de detecção de embarcações estão associadas a modificações das características físicas da mesma, criando uma nova interação da embarcação com o meio ao qual irá atuar, principalmente no que tange a visualização destas estruturas por meio de radar, visual, infravermelho, emissão sonora, entre outros. (MILEWSKI et al. , 2011).

#### 2.1.1. Redução da Assinatura Acústica de Embarcações

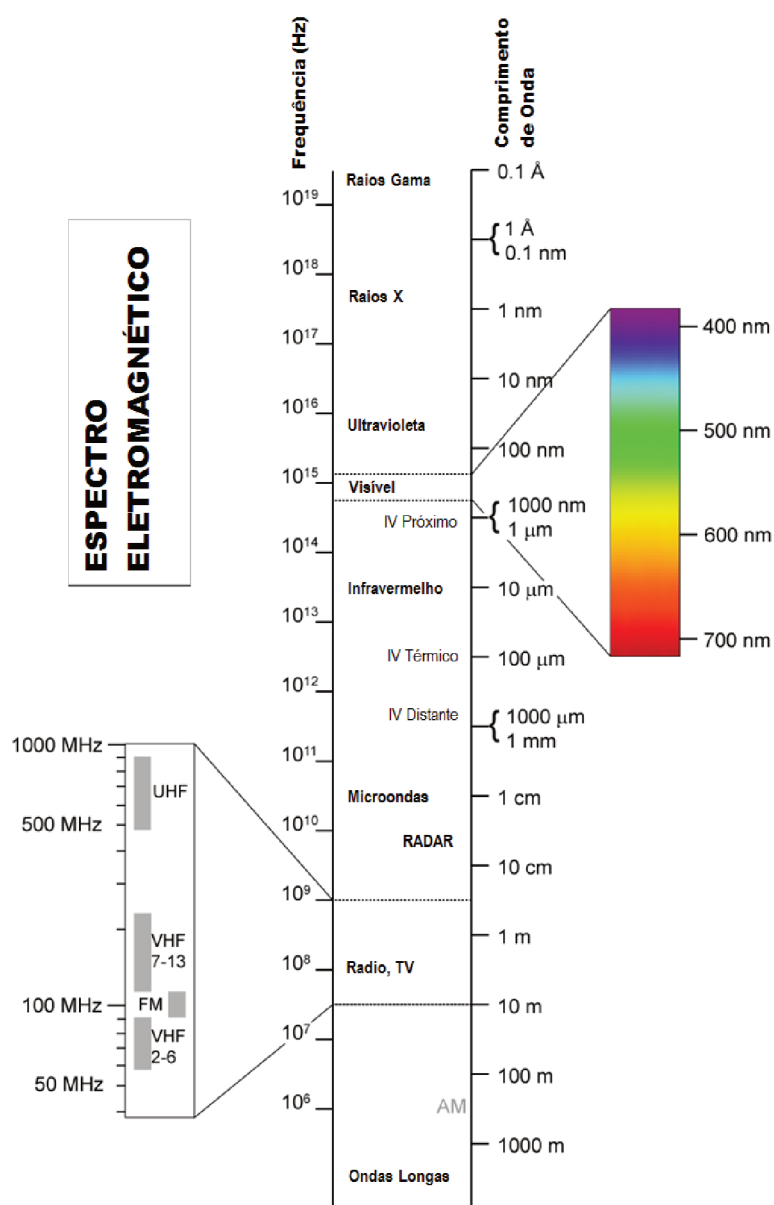
A assinatura acústica de um objeto diz respeito à sua interação mecânica com o meio e em embarcações é caracterizada pela sobreposição de ruídos emitidos pelas máquinas, propulsor, água fluindo pelo casco e todas as fontes de vibração a bordo da mesma. Essa assinatura pode ser minimizada utilizando projetos especiais de propulsores, buscando evitar a indução de ressonâncias; revestindo as paredes da praça de máquinas com absorvedores sonoros; utilizando soluções de máquinas, transmissões e acoplamentos mais silenciosos e; fazendo uso de formas de casco com curvas suaves, visando causar redução de turbulências na água (LAVERS, 2012).

Tupper (2004) afirma que é impossível remover completamente a assinatura sonora de uma embarcação, e que o foco de um projetista deve ser utilizar das frequências emitidas pelo próprio mar para camuflar o ruído da embarcação. Lavers (2012) explica que devido a água absorver a radiação eletromagnética na faixa de frequência utilizada em radares, o som é o principal mecanismo de identificação utilizado em submarinos e torpedos, através de equipamentos de SONAR (do inglês *Sound Navigation and Ranging*), portanto, para uma embarcação de combate moderna a importância de se minimizar a emissão de sons não deve ser subestimada.

### 2.1.2. Camuflagem Visual de Embarcações

Camuflagens à RADAR, sensores infravermelho e visual estão relacionadas à interação da embarcação com ondas eletromagnéticas em diferentes faixas de comprimentos de onda ( $\lambda$ ), como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Representação do Espectro Eletromagnético



Fonte: Adaptado de LAVERS, 2012, p. 5.

O olho humano percebe a presença de um objeto, quando este reflete ou emite radiação eletromagnética com comprimentos de onda entre 380 e 750nm. Com a

informação captada pelas células da retina, o cérebro discretiza o intervalo de  $\lambda$  captado em um intervalo de cores, formando uma imagem. Se um objeto não emite, porém absorve completamente radiação nessa faixa de  $\lambda$ , os olhos perceberão o objeto na cor preta, ou seja, na ausência de cor. Caso, o objeto reflita ou emita com mesma intensidade todos os  $\lambda$  da banda visível, os olhos o perceberão na cor branca, ou seja, a soma de todas as cores. Caso exista algum  $\lambda$  preferencial de emissão ou reflexão dentro da faixa visível, os olhos perceberão o objeto com a cor correspondente ao  $\lambda$  preferencial e, por fim, caso o objeto não emita, porém, transmita toda a radiação incidente na banda visual, os olhos não o perceberão, dando característica de transparência ao material. (BLATTNER ET. AL, 2012).

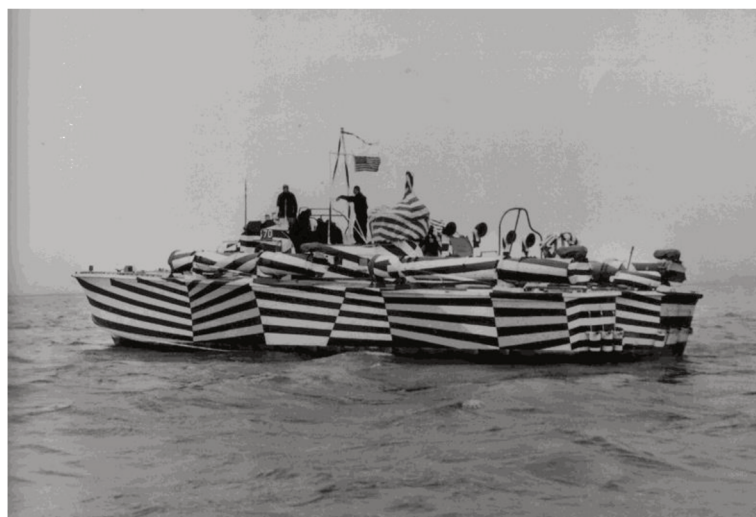
O efeito desejável na camuflagem visual de uma embarcação é torna-la invisível ou não identificável quando em operação. Devido à dificuldade tecnológica de se construir uma embarcação transparente, os métodos mais adotados para a camuflagem visual são, segundo Troscianko et. al (2008):

- i) Criando uma condição onde a faixa de reflexão e emissão do objeto seja igual em intensidade e banda à faixa de reflexão e emissão do ambiente ao redor, utilizando pintura;
- ii) Criando a ilusão de um contorno através de texturas e mudança de iluminação, para dificultar a identificação do real contorno da embarcação, e;
- iii) Introduzindo detalhes de pintura aleatórios em alto contraste, visando mascarar o contorno real da embarcação, como mostra a Figura 3.

Nos casos ii) e iii) a posição do observador não influi no potencial de camuflagem, assumindo que os detalhes de textura, luz ou pintura sejam distribuídos por toda a superfície da embarcação, porém, no caso i) é necessário considera-la, pois o meio ao redor do navio poderá ser diferente dependendo da posição do observador.

Considerando um navio em meio ao oceano, existem três maneiras de se perceber o ambiente ao redor, sendo: Céu e Mar, caso o observador esteja no mesmo nível do navio em relação ao horizonte (Ex: Observador a bordo de outra embarcação); Céu, caso o observador esteja próximo ao costado e em um nível mais baixo que o navio em relação ao horizonte (Exemplo: Observador a bordo de um bote próximo ao costado do navio), e; Mar, caso o observador esteja em um nível mais alto que o navio em relação ao horizonte (Exemplo: Observador em um avião). Portanto, para um projeto de camuflagem visual de um navio deve-se levar em consideração o meio, e a posição do observador o qual há a intenção de se esconder.

Figura 3 – Exemplo de camuflagem por ilusão de contorno



Fonte: Site Navsource<sup>1</sup>

### 2.1.3. Redução da Assinatura Infravermelho/Térmica

A emissão de radiação infravermelha por um objeto está intimamente ligada com a temperatura da superfície do mesmo. Rogalwski e Chrzanowski (2014) afirma que todos os objetos são formados por átomos que vibram continuamente, vibrações essas que induzem uma radiação eletromagnética associada, devido à vibração das partículas carregadas do átomo (elétrons e prótons). A frequência dessas vibrações é diretamente proporcional a temperatura do objeto, o que implica na constatação que quanto mais quente a superfície de um objeto, maior será a frequência da radiação emitida pelo mesmo. Para temperaturas

---

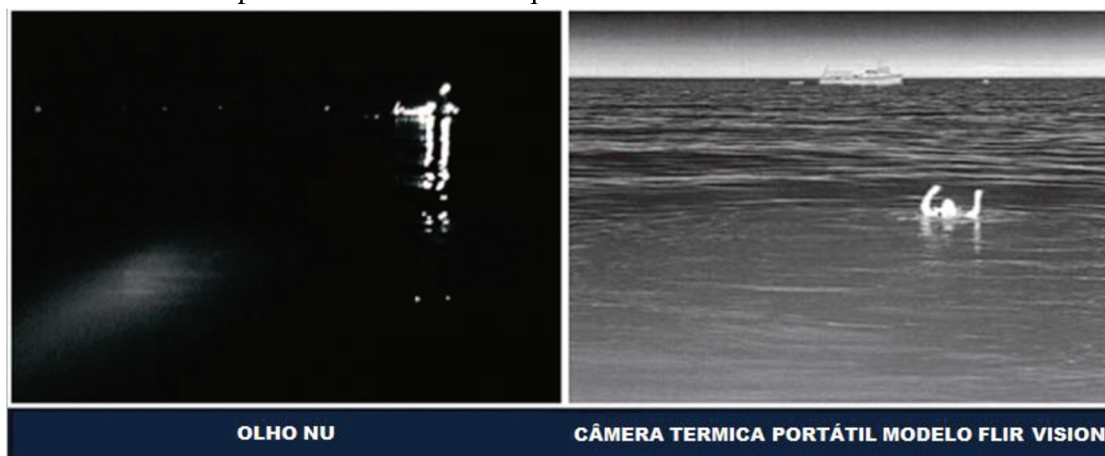
<sup>1</sup> Disponível em <<http://www.navsource.org/archives/12/120517001.jpg>> Acesso em Março/2016

de até 1000K, a maior parte dessa radiação será na banda de infravermelho. A radiação eletromagnética na banda de infravermelho possui comprimento de onda maior que a radiação na banda visual e não pode ser detectada a olho nu. Portanto, criando-se dispositivos capazes de identificar diferentes frequências de radiação infravermelha, podem-se identificar regiões mais quentes que outras, dentro de um horizonte de análise. Atribuindo-se cores aos diferenciais de temperatura no espaço, é possível a criação de imagens térmicas de um objeto, propiciando a identificação de alvos em condição de visibilidade limitada ou escuridão, como mostra a Figura 4.

A emissão eletromagnética de um objeto em função de sua temperatura é conhecida como assinatura térmica.

Segundo Volmer e Mollman (2010), os primeiros dispositivos capazes de detectar emissões em infravermelho e criar imagens da fonte emissora visando a detecção de um alvo começaram a ser utilizados na década de 1970. Nessa época, devido ao preço e tamanho do equipamento, estes eram utilizados apenas em operações militares. A evolução da tecnologia foi tamanha, que no início do Século XXI dispositivos de imagem térmica puderam ser adquiridos por cidadãos comuns, com preços e tamanhos comparados a de câmeras fotográficas.

Figura 4 – Comparação de imagem captada em banda de olho nu e com câmera térmica portátil na faixa de frequência de infravermelho



Fonte: Adaptado do site da empresa Landfall Navigation<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Disponível em <<http://www.landfallnavigation.com/flirfirstmate.html>> Acesso em Março/2016

Considerando o exposto, percebe-se a importância do controle de emissão de radiação na banda de infravermelho em uma embarcação furtiva.

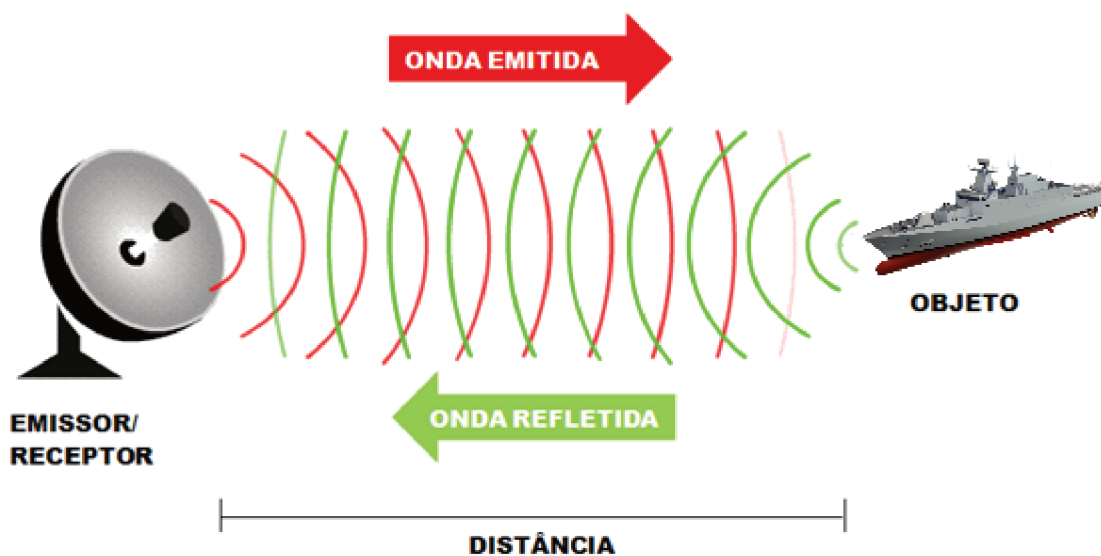
Como no caso de camuflagem visual, Milewski et al. (2011) afirma que a escolha da técnica de camuflagem térmica a ser adotada também depende da posição do observador, pois as câmeras térmicas só conseguem identificar um alvo contrastando a emissão infravermelha do mesmo com a do ambiente ao redor. De acordo com Thompson, Vaitekunas e Brooking (2000) as técnicas mais utilizadas para suprimir a assinatura térmica de uma embarcação são:

- i) Resfriamento dos gases de escape e isolamento térmico de suas respectivas redes de tubulação;
- ii) Utilização de tratamentos superficiais e tintas para alterar os valores de absorção e reflexão eletromagnética de uma área. Este processo faz com que a reflexão ou absorção da radiação incidente do ambiente seja usada para mascarar áreas mais quentes na superfície da embarcação;
- iii) Recobrimento da embarcação com uma névoa de água, bombeando água do oceano de dentro para fora da embarcação, criando uma cortina que impedirá a caracterização da assinatura térmica da embarcação.
- iv) Resfriamento com água salgada das superfícies expostas ao sol da embarcação.

#### **2.1.4. Redução da Assinatura RADAR**

Radar (Radio Detecting and Ranging) é um aparelho que permite a identificação de um objeto à distância através dos princípios de emissão, reflexão e absorção de ondas eletromagnéticas. O esquema básico de funcionamento consiste na emissão de ondas eletromagnéticas pelo aparelho, as quais são refletidas por qualquer objeto que cruze o feixe emitido e retornem a uma antena de absorção, podendo assim identificar a presença do objeto, como ilustrado pela Figura 5. (SAVILLE, 2005).

Figura 5 – Princípio da reflexão utilizado em aparelhos de RADAR



Fonte: Adaptado do Site Sky Radar<sup>3</sup>

Lavers (2012) explica que quando um radar emite ondas eletromagnéticas em forma de pulsos que atingem a superfície de um objeto, uma parte dessa energia poderá ser refletida para o receptor do radar. Sendo  $t$  o intervalo de tempo entre a emissão do pulso e o recebimento do eco, conhecida a velocidade do pulso como aproximadamente a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ), a distância ( $d$ ) entre o objeto e o emissor pode ser calculada por:  $d = ct/2$ . Divide-se o produto  $c*t$  por dois para se encontrar a distância emissor-objeto, devido ao caminho de ida e volta que o sinal faz desde que é emitido, representando duas vezes a distância real.

Os radares foram desenvolvidos para fins militares, com o propósito de identificar veículos inimigos dentro de uma área de abrangência, por isso, desde a década de 1930, quando começaram a ser utilizados, iniciaram-se os estudos em busca de soluções para reduzir o potencial de detecção de veículos, com finalidade de escondê-los de radares inimigos.

---

<sup>3</sup> Disponível em <[http://www.skyradar.com/wp-content/uploads/2014/11/radar\\_animation\\_01.gif](http://www.skyradar.com/wp-content/uploads/2014/11/radar_animation_01.gif)> Acesso em Março/2016

Segundo Charris e Torres (2012) a grandeza de um objeto, relacionada ao seu potencial de detecção por radar chama-se Seção Reta Radar (Radar Cross Section - RCS), e é indicativo do potencial de reflexão das ondas incidentes no objeto na direção da antena receptora do radar, geralmente representada por  $\sigma$ , medida em metros quadrados. Lavers (2012) afirma, porém, que o RCS de um objeto, mesmo que medido em metros quadrados, não é igual a sua área geométrica e sim igual à área perpendicular ao feixe de ondas incidente.

Milewski (2011) afirma que na década de 1970 houve grande avanço em tecnologias para modificar a RCS de objetos, decorrente de pesquisas no setor aeronáutico. A introdução de materiais compósitos na construção da fuselagem e a adoção de formas não usuais para aeronaves permitiu a redução de suas RCS, devido à absorção e reflexão da radiação incidente. A síntese do avanço tecnológico nessa área na época foi a aeronave F-117, que representa a primeira geração de aeronaves furtivas.

As técnicas adotadas para reduzir o RCS de embarcações são provenientes das tecnologias desenvolvidas para o setor aeronáutico e, segundo Yi, Wang e Huang (2015) e Lavers (2012) podem seguir três principais diretrizes:

- i) Incorporação de materiais com baixa refletividade a radar, como plásticos, compósitos de carbono e fibra de vidro, nas áreas externas da embarcação;
- ii) Utilização de revestimento com materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) por toda a superfície da embarcação e;
- iii) Busca por formas orgânicas ou facetadas com ângulos obtusos, visando eliminar formas do tipo diedro e triedro, onde duas ou três superfícies se encontram em 90 graus.



## 2.2. MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

É chamado de material absorvedor de radiação eletromagnética (MARE) todo o material que, através de mecanismos próprios, consegue transformar parte da energia da radiação eletromagnética incidente em calor, dissipando-a. (SOETHE, 2009). A finalidade desse tipo de material, segundo Dias (2000) é reduzir a reflexão de radiação eletromagnética em diferentes direções, e dentre as principais aplicações pode-se citar a blindagem de equipamentos eletrônicos e a camuflagem a radar de veículos militares.

### 2.2.1. Princípios de Funcionamento de MARE

MARE's podem ser classificados como dielétricos, magnéticos ou híbridos, em função de seu tipo de interação com o campo eletromagnético. Simões (2005) afirma que a estrutura, aspecto e composição de um MARE são definidos pela aplicação que se pretende dar ao material, e que as propriedades intrínsecas que diferenciam MARE's de outros materiais são: permissividade elétrica ( $\epsilon$ ); permeabilidade magnética ( $\mu$ ), tangente de perda ( $\text{tg } \delta$ ) e impedância ( $Z$ ).

Permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ) são representadas por valores complexos que, portanto apresentam termos reais e imaginários, sendo os termos reais responsáveis pelo processo de armazenamento de energia, e os termos imaginários, responsáveis pelo processo de dissipação de energia dos campos elétrico e magnético incidentes, respectivamente (DIAS, 2000; SIMÕES, 2005; SOETHE, 2009).

A permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) de um material é uma grandeza complexa, como demonstra a Equação 1.

$$\epsilon = \epsilon' - j \epsilon'' \quad (1)$$

Sendo:  $\epsilon'$  o termo real, ligado ao armazenamento de energia do campo elétrico incidente e;  $\epsilon''$  o termo imaginário, ligado à dissipação do mesmo campo.

Analogamente, a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) de um material é dada pela Equação 2.

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

Sendo:  $\mu'$  o termo real, ligado ao armazenamento de energia do campo magnético incidente e;  $\mu''$  o termo imaginário, ligado à dissipação do mesmo campo.

As tangentes de perda elétrica ( $\text{tg } \delta$ ) e magnética ( $\text{tg } \delta_m$ ), apresentadas nas Equações 3 e 4, são dadas pela relação dos componentes reais e imaginários da permissividade elétrica e permeabilidade magnética, respectivamente. Qualitativamente, representam a relação de energia dissipada e energia armazenada no material.

$$\text{tg } \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (3)$$

$$\text{tg } \delta_m = \mu'' / \mu' \quad (4)$$

A impedância ( $Z$ ) de um material é uma razão entre a permeabilidade magnética e permissividade elétrica do mesmo. Dada pela Equação 5.

$$Z = \sqrt{\mu / \varepsilon} \quad (5)$$

Soethe (2009) afirma que para que um material não reflita uma radiação incidente em sua superfície, sua impedância ( $Z$ ) deve ser semelhante à impedância de espaço livre ( $Z_0$ ). Sendo  $Z_0$  dada pela Equação 6.

$$Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = 377 \, \Omega \quad (6)$$

De acordo com Simões (2012) e Lee (1991), a magnitude da reflexão ( $R$ ) da radiação incidente sobre um material é dada pela Equação 7.

$$R = \frac{1 - Z/Z_0}{1 + Z/Z_0} \quad (7)$$

Definição esta, que vai de acordo com a afirmação de Soethe (2009), prevendo que para obter-se uma magnitude de reflexão ( $R$ ) igual a zero, faz-se necessário que os valores de impedância do material e do meio livre sejam iguais.

### 2.2.2. Absorvedores Dielétricos

Soethe (2009) afirma que MARE's dielétricos são caracterizados por apresentarem ou poderem ser induzidos a apresentar uma estrutura do tipo dipolo elétrico, onde existe a separação de cargas positivas e negativas.

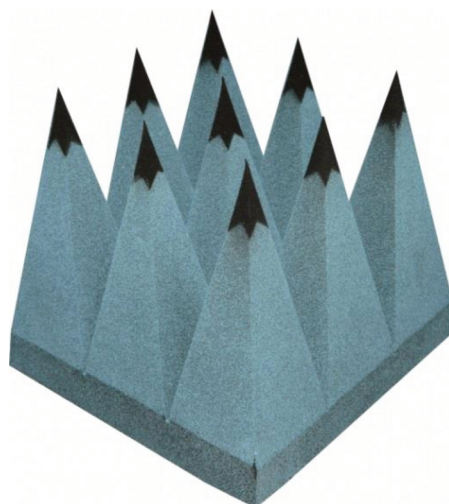
A grandeza ligada ao mecanismo de armazenamento e dissipação de energia em MARE's dielétricos é a permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) que, qualitativamente está ligada a capacidade de um material se polarizar quando exposto a um campo elétrico. A polarização, segundo Simões (2005) pode acontecer de três maneiras diferentes, dependendo do tipo de material:

- i) No caso de materiais que apresentam estruturas polares, ou seja, dipolos permanentes, quando um campo elétrico é incidido em sua superfície, ocorre um fenômeno chamado polarização de orientação, onde as cargas positivas e negativas do material, que inicialmente se encontram espalhadas, se alinham com o campo incidente, armazenando energia. A dissipação dessa energia está associada à despolarização natural do material, gerando corrente elétrica que, por efeito Joule tende a dissipar calor;
- ii) Caso o material apresente moléculas com ligação iônica, a polarização ocorrerá devido ao momento dipolo líquido diferente de zero, devido ao deslocamento dos íons positivos e negativos em direções opostas, e;
- iii) Em ambos os casos citados também ocorre a polarização devido ao deslocamento do núcleo do átomo em relação ao centro, que volta ao centro quando o campo incidente deixa de agir.

MARE's dielétricos são geralmente formados por incorporação de materiais carbonosos, como negro de fumo, em uma matriz isolante. Os exemplos mais comuns são

os absorvedores piramidais utilizados em câmaras anecoicas, onde uma matriz de borracha é impregnada com negro de fumo, como ilustra a Figura 6. Segundo Soethe (2009), esse tipo de absorvedor, baseado em compostos carbonosos necessita de uma espessura da ordem de centímetros para ser efetivo o que pode representar um problema para aplicações de revestimentos externos de veículos ou equipamentos eletrônicos. Porém, estudos recentes revelam que é possível se obter MARE's dielétricos com espessuras na ordem de nanômetros, com a utilização de filmes finos metálicos, tema este a ser explorado no presente trabalho.

Figura 6 – Exemplo de um MARE dielétrico piramidal.



Fonte: Site da empresa Microwave Vision Group<sup>4</sup>

### 2.2.3. Absorvedores Magnéticos

Em MARE's magnéticos, tanto a permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) quanto a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) são grandezas de interesse (DIAS, 2000; SOETHE, 2009; SIMÕES, 2005). Qualitativamente, a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) de um material está ligada ao momento magnético de seus átomos, gerado pelo momento de rotação dos elétrons em torno do próprio eixo (movimento de spin) e em torno do núcleo atômico. A

---

<sup>4</sup> Disponível em <[http://www.mvg-emc.com/sites/www.mvg-emc.com/files/imagecache/product\\_view/stdndrabsrbrs\\_HD.jpg](http://www.mvg-emc.com/sites/www.mvg-emc.com/files/imagecache/product_view/stdndrabsrbrs_HD.jpg)> Acesso em Jun/2015

absorção da radiação eletromagnética, em MARE's magnéticos ocorre quando os elétrons têm sua velocidade de spin aumentada, devido a parcela magnética da radiação incidente, fazendo com que seu momento magnético aumente, armazenando energia. A dissipação da energia armazenada ocorre quando os elétrons invertem seu spin, após atingir altas velocidades (SIMÕES, 2005).

MARE's magnéticos também apresentam o mecanismo dielétrico de absorção de radiação e normalmente são formados por dispersão de materiais magnéticos, como ferritas, cobalto e níquel, em uma matriz polimérica. Sua principal vantagem em relação aos MARE's dielétricos é sua menor espessura, porém apresenta banda de absorção mais estreita (SOETHE, 2009; SIMÕES, 2005). Um exemplo de MARE magnético é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Exemplo de uma folha de absorvedor magnético comercial.



Fonte: Site da empresa Microwave Product Digest<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Disponível em <<http://www.mpdigest.com/issue/Articles/2012/Apr/emerson/pic4.jpg>> Acesso em Jun/2015

#### 2.2.4. MARE na Indústria Naval

A primeira tecnologia criada com a intenção de reduzir a RCS de navios, foi apresentada em uma patente americana do começo da década de 1940, chamada Salisbury Screen, em homenagem a seu inventor, Winfield Salisbury (LAVERS, 2012). O princípio de funcionamento do Salisbury é o cancelamento do reflexo da radiação incidente, por interferência. Esse tipo de absorvedor, conhecido como ressonante ou  $\frac{1}{4}$  de onda, possui uma estrutura multicamadas, onde uma folha resistiva é fixada sob um material espaçador entre a folha resistiva e a superfície do veículo com uma distância de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda que se deseja absorver (HYDE;BOGLE;HAVRILLA, 2014). A distância de  $\frac{1}{4} \lambda$  é utilizada para se obter a interferência destrutiva das parcelas de energia refletidas pela folha resistiva e pela superfície do veículo. A interferência destrutiva é causada devido a reflexão de ondas na mesma direção, porém em fases opostas (SIMÕES, 2005). O processo de absorção é descrito sequencialmente.

- i) A radiação incide sob a primeira camada do absorvedor, parte dela é refletida e parte é transmitida pelo material espaçador;
- ii) A parcela transmitida percorre o material espaçador até encontrar a superfície reflexiva do veículo (segunda camada) onde é refletida, porém, devido a distância de  $\frac{1}{4} \lambda$  em relação a primeira camada, quando a onda refletida pela segunda camada encontrar a onda refletida pela primeira camada, ela estará defasada em  $\frac{1}{2} \lambda$  devido ao caminho de ida e volta e portanto, em fase oposta, propiciando uma interferência destrutiva.
- iii) Parte da radiação refletida pela segunda camada é transmitida pela primeira camada, cancelando a primeira reflexão e parte é novamente refletida para o interior do material, que vai dissipando parte dessa energia em uma taxa exponencial, dependente do espaçamento entre primeira e segunda camada.

No caso específico do Salisbury, o material espaçador utilizado é o ar, e é utilizada apenas uma folha resistiva, posicionada a  $\frac{1}{4} \lambda$  da onda que se pretende absorver. Para uma

faixa de  $\lambda$  específica, o Salisbury pode atenuar até 20 dB da radiação incidente, porém sua banda de atuação é muito estreita. Ainda na década de 1940, verifica-se uma patente de um material chamado Jaumann, que consiste basicamente em um Salisbury com várias camadas de folha resistiva, visando o aumento da largura da banda de absorção. No Jaumann as folhas resistivas são posicionadas em diferentes posições, múltiplas de  $\frac{1}{4} \lambda$  das ondas que se pretende absorver (SAVILLE, 2005). Neste caso a largura da banda de absorção é dependente do número de camadas de folhas resistivas no material, portanto, para um Jaumann de banda larga seria necessário um grande número de camadas, acarretando peso e volume ao material.

Saville (2005) comenta que os primeiros absorvedores de Salisbury e Jaumann eram fabricados utilizando lonas esticadas em estruturas de compensado. Fazia-se uma deposição de grafite na lona para controlar sua impedância, buscando um valor semelhante de  $Z_0$ . Porém, Lavers (2012) explica que devido a alta umidade do meio marítimo, e a dificuldade de se construir um MARE impermeável, a sua aplicação na indústria naval foi pontual. A partir da segunda metade do Século XX, as soluções adotadas para a redução da RCS de embarcações foram basicamente geométricas, buscando-se reduzir seções transversais e longitudinais paralelas, e também introduzindo materiais compósitos de plástico reforçado com fibras de vidro e carbono na estrutura, que reduzem a reflexão da radiação incidente se comparado com embarcações fabricadas de materiais metálicos. A evolução das geometrias de embarcações é apresentada esquematicamente na Figura 8.

Figura 8 – Evolução da geometria de embarcações, visando a redução da RCS



Fonte: Adaptado de MILEWSKI et al, 2011, p. 2

A primeira embarcação com projeto vocacionado a redução de RCS foi o Sea Shadow, em 1984. Essa embarcação do tipo SWATH foi construída pela empresa americana de aviação, Lockheed, utilizando das soluções geométricas e de materiais

empregados para reduzir o RCS de aeronaves furtivas, como o F-117A ‘Nighthawk’, fabricado em 1976 pela mesma empresa (LAVERS, 2012).

A solução geométrica adotada foi a utilização de superfícies inclinadas na lateral da embarcação, teto plano na posição horizontal, e proa e popa inclinadas em forma de bico buscando a dispersão da radiação refletida. O material utilizado na construção foi fibra de carbono, por apresentar, além de melhor relação peso/resistência, menor índice de reflexão eletromagnética em relação aos aços navais (LAVERS, 2012). A Figura 9 ilustra uma imagem da embarcação Sea Shadow.

Figura 9 – Imagem ilustrativa de embarcação furtiva Sea Shadow



Fonte: Site NavSource Naval History<sup>6</sup>

Países como Suécia, Noruega, Inglaterra e Estados Unidos possuem embarcações furtivas modernas em suas frotas, como a classe de corveta Visby, ilustrada na Figura 10, e o navio de patrulha M80 Stiletto. Na literatura é possível encontrar informações qualitativas sobre algumas das tecnologias empregadas nestas embarcações, principalmente quanto à solução geométrica e o material base adotado, porém, é escassa qualquer informação específica sobre os MARE's utilizados, mesmo que em diversas referências, como em Tupper (2004), Lavers (2012) e Milewski et. al (2011), seja citado o uso dessa classe de materiais nestas embarcações. Soethe (2009) explica que devido a

---

<sup>6</sup> Disponível em <<http://www.navsource.org/archives/09/46/094652912.jpg>> Acesso em Jun/2015



natureza militar da tecnologia de MARE's, seu estudo é considerado estratégico para a soberania de um país, daí a dificuldade de se obter informações relevantes sobre os MARE's utilizados.

Figura 10 – Imagem ilustrativa de uma corveta classe Visby da marinha da Suécia



Fonte: Site Natiostates<sup>7</sup>

### 2.3. FILMES FINOS

Filmes finos metálicos, como o nome sugere, são metais dispostos em finas camadas sob um substrato que lhe conceda integridade estrutural. Normalmente os filmes apresentam espessuras na ordem de dezenas de nanômetros a alguns micrômetros.

De acordo com Greene (2003), os primeiros estudos sobre o tema datam da década de 1950, devido ao avanço das tecnologias de alto e ultra alto vácuo, necessárias para o controle do processo de deposição dos filmes. As primeiras aplicações desse tipo de material foram em revestimentos de alta dureza e resistentes a corrosão para ferramentas e

---

<sup>7</sup> Disponível em <<http://www.nationstates.net>> Acesso em Abr/2016

equipamentos para indústria aeronáutica, óptica e automotiva. A partir da década de 1970 os estudos começaram a se focar nas propriedades (mecânicas, eletromagnéticas e ópticas) particulares de filmes finos, que diferem das propriedades do material quando em forma maciça. As mudanças de propriedades são influenciadas pela relação de dimensão entre superfície e volume do material, e são muito dependentes do processo de formação do filme.

### 2.3.1. Métodos de Obtenção de Filmes Finos

Seshan (2002) afirma que os métodos de obtenção de filmes finos metálicos podem ser divididos em:

- i) Métodos evaporativos;
- ii) Processos de descarga luminescente;
- iii) Processos de deposição química na fase vapor, e;
- iv) Processos de deposição química na fase líquida.

O item (i) engloba os processos de deposição de filmes por evaporação a vácuo, onde o material metálico base é aquecido até seu ponto de evaporação, gerando vapor que por sua vez é transportado e condensado sob a superfície do substrato.

Os processos que se relacionam com o item (ii) envolvem a técnica de Sputtering, na qual os átomos do metal base são arrancados fisicamente devido ao impacto de íons, que são gerados por um plasma em uma câmara a baixa pressão. Depois de arrancados, os átomos em fase vapor são condensados na superfície do substrato, formando um filme.

Os processos de deposição química na fase vapor (CVD), indicados no item (iii) são processos puramente químicos, que envolvem a síntese de um material onde as substâncias constituintes da fase vapor reagem quimicamente na superfície do substrato, formando um filme sólido.

Por fim, nos processos englobados pelo item (iv), o material base, em forma líquida é gotejado e centrifugado sobre a superfície do substrato, formando um filme homogêneo (TATSCH, 2000).

Soethe (2009) afirma que as particularidades de cada processo de obtenção de filmes, como pressão de gás de trabalho, presença de contaminantes na atmosfera, energia das partículas que chegam ao substrato, influem diretamente nas propriedades elétricas, ópticas e mecânicas dos recobrimentos. A autora afirma também, que dentre os métodos de obtenção citados, os processos que possibilitam o maior controle de espessura, uniformidade e pureza dos filmes, são os que utilizam a técnica de Sputtering, técnica esta, empregada na realização do presente trabalho.

### 2.3.2. Filmes Finos Absorvedores de Radiação Eletromagnética

Materiais metálicos apresentam comportamento refletor de radiação eletromagnética quando em forma volumétrica, porém, quando o mesmo material é disposto em forma de filme fino, com espessuras na ordem de dezenas de nanômetros, é observado um aumento significativo da porção de radiação que é absorvida (DELATORRE, 2013).

Soethe (2009) apresenta resultados de até 50% de absorção da radiação na faixa de 8 a 12 GHz em filmes finos de titânio (Ti) com espessuras variando de 15 nm a 420 nm, em substrato polimérico.

A mudança no comportamento de absorvidade eletromagnética acontece quando o filme apresenta espessuras abaixo da profundidade de penetração ( $\delta$ ) da onda eletromagnética incidente no meio. Isso permite com que a radiação penetre no material, e promova a criação de uma corrente elétrica em seu interior, fenômeno conhecido como corrente de Eddy. Essas correntes induzidas utilizam da energia da radiação incidente, e são dispersas através das descontinuidades do filme, gerando calor por efeito Joule (SOETHE, 2009).

A profundidade de penetração é uma propriedade que mensura a distância na qual a amplitude do campo eletromagnético induzido no material é reduzida a uma taxa de 0,36 do seu valor inicial e é dependente da frequência da onda incidente e da resistividade do material do filme. Tal propriedade pode ser calculada pela Equação 8.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (8)$$

Onde  $f$  é a frequência da radiação incidente;  $\mu$  a permeabilidade magnética do material e;  $\sigma$  a condutividade do material.

A Tabela 1 contém dados sobre a profundidade de penetração de alguns metais em função da frequência de onda.

Tabela 1 – Profundidade de penetração de metais em função da frequência de onda incidente.

Metal	$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )	$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )
	$f = 1 \text{ GHz}$	$f = 15 \text{ GHz}$
Cobre	2.05	0.53
Ouro	2.43	0.63
Alumínio	2.59	0.67
Níquel	4.16	1.07
Cromo	5.75	1.48
Titânio	10.3	2.66

Fonte: SALMON, 1993.

A partir desses valores é possível realizar o dimensionamento preliminar da espessura máxima de um filme fino metálico com propriedades de absorção de radiação na faixa de frequências escolhida.

## 2.4. MATERIAIS COMPÓSITOS

Entende-se por material compósito todo o material que possui pelo menos duas fases distintas, normalmente uma fase chamada de reforço (fase dispersa) e outra de matriz (fase contínua). Essa classe de materiais apresenta uma combinação das propriedades de seus constituintes, possibilitando assim a obtenção de materiais com propriedades superiores para uma determinada aplicação.

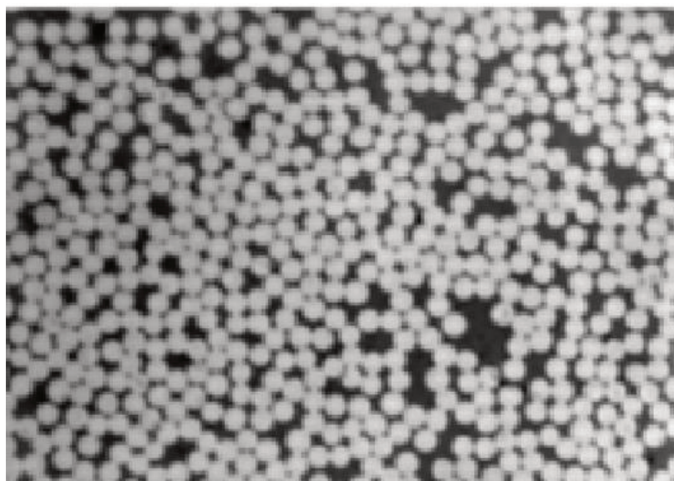
De acordo com Ventura (2009) as propriedades dos compósitos dependem das propriedades físicas das fases constituintes e também de suas quantidades relativas, e da geometria da fase reforço.

Existem materiais compósitos naturais, como as madeiras, que apresentam celulose como reforço e lignina como matriz, e compósitos sintéticos, que em sua maioria apresentam uma matriz polimérica reforçada por fibras de vidro ou carbono. Herakovich

(2012) afirma que os primeiros compósitos sintéticos que se tem registro datam de 4000A.C, quando os egípcios tramaram as fibras da planta *Cyperus Papyrus* em diferentes ângulos e as encharcaram com água até que começasse a decomposição que liberava um tipo de resina utilizada para melhorar a adesão entre os reforços. Esse processo deu origem a um tipo de papel, conhecido como papiro.

Ao longo da história, diversas utilizações de materiais com fases matriz e reforço foram observadas, desde tijolos reforçados por cordas até paredes de barro com estrutura de madeira, porém apenas no Século XX os compósitos começaram a ser produzidos pela indústria com embasamento científico. A fibra de vidro foi desenvolvida pela empresa americana Owens-Corning em 1938, e em 1941 estava disponível no mercado. As fibras de carbono e aramida começaram a ser produzidas nos anos de 1961 e 1964, respectivamente (HERAKOVICH, 2012). A Figura 11 ilustra a imagem obtida em microscópio da seção transversal de um compósito de resina epóxi reforçado por fibra de carbono, onde é possível observar claramente as fases reforço, em branco, e matriz em preto.

Figura 11 – Seção transversal de um compósito de resina epoxy reforçada por fibra de carbono.



Fonte: HERAKOVICH, 2012, p. 5

Ventura (2009) afirma que atualmente os mercados que mais utilizam os materiais compósitos são: transportes (31%); construção civil (19,7%); indústrias do ramo naval (12,4%); equipamentos eletroeletrônicos (9,9%); produtos de consumo (5,8%) e; setor aeroespacial (0,8%).

### 2.4.1. Materiais Compósitos na Indústria Naval

Os materiais mais utilizados na construção de navios são aço e alumínio, no entanto, segundo Chalmers (1994) um estudo da década de 1960 revelou que compósitos de polímeros reforçados com fibras (PRF) oferecem melhor relação de peso/resistência e menor índice de reflexão eletromagnética, como medida defensiva contra minas navais com sensor magnético e detecção por radares, em relação aos aços navais, apresentando grande potencial de uso na indústria naval.

Russel (2005) cita algumas vantagens do uso de PRF em relação aos aços, tais como:

- i) *Redução de peso:* Estruturas de compósito podem apresentar até 25% de redução de peso em relação a uma estrutura de aço, com resistência estrutural equivalente;
- ii) *Facilidade de obtenção de formas complexas:* Devido à maleabilidade dos reforços de fibra antes de serem curados com a matriz polimérica, é relativamente simples a obtenção de formas complexas que favoreçam um melhor rendimento hidrodinâmico da embarcação;
- iii) *Longevidade do casco:* Devido à baixa susceptibilidade de corrosão e ao comportamento elástico da estrutura em caso de colisão, cascos de PRF podem manter sua integridade estrutural por mais tempo que cascos metálicos operando nas mesmas condições.

O ramo naval de esporte e recreio foi o primeiro segmento da indústria naval a utilizar PRF intensivamente, desde a década de 1970. Isso pode ser explicado, dentre outros fatores: pela baixa criticidade da operação desse tipo de embarcação; alto valor agregado, permitindo a utilização de materiais mais caros na construção das mesmas, e; percepção de valor pela estética (KIMPARA, 1991). A Figura 12 ilustra uma embarcação de recreio moderna, construída inteiramente em compósito de fibra de vidro e resina epóxi.

Figura 12 – Embarcação de recreio construída com polímero reforçado com fibra de vidro.



Fonte: Site do estaleiro Astondoa<sup>8</sup>

Job (2015) afirma que a utilização de compósitos em componentes estruturais de embarcações comerciais depende da aprovação e inclusão desses materiais nas normas reguladoras de segurança internacionais, como a SOLAS (Safety of Life at Sea), que prevê que nenhum material estrutural de uma embarcação seja inflamável, o que impossibilita a utilização de polímeros. O não cumprimento das normas do SOLAS impossibilita a operação comercial da embarcação. Apesar disso, houveram muitos avanços na utilização de compósitos em componentes não estruturais de embarcações comerciais, principalmente em casarias e superestrutura.

Marsh (2006), Mouritz et al (2001) e Santos, Temarel, Soares (2009) ressaltam que em embarcações militares, que não são obrigadas a seguir a SOLAS, a utilização de compósitos cresceu muito nas últimas décadas, principalmente em embarcações de patrulha.

Considerando o exposto e a importância do tema a nível mundial, o presente trabalho visa avaliar o comportamento de absorção eletromagnética na faixa de frequências de micro-ondas (RADAR) de filmes finos metálicos depositados sobre um substrato de fibra de vidro, visando sua utilização no setor naval, buscando diminuir o potencial de detecção por radar das embarcações em geral, com reduzida influência em termos de peso e volume da estrutura.

---

<sup>8</sup> Disponível em <<http://www.astondoa.com/models/flybridge/80-glx/exterior>> Acesso em Abr/2016

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os materiais, processos e equipamentos utilizados no presente trabalho para obtenção dos compósitos com filmes finos depositados na fase reforço e para realizar as caracterizações físicas e eletromagnéticas.

#### 3.1. MATERIAIS

Nesta seção serão abordados os materiais escolhidos para a confecção das amostras, como os critérios de escolha e suas respectivas propriedades.

No trabalho de Soethe (2009) foram obtidos MARE baseados em filmes de titânio sobre um substrato polimérico contínuo. No presente trabalho, a tecnologia descrita por Soethe será avaliada em um material que seja amplamente utilizado na construção naval, sem a necessidade de revestimentos externos ou mudanças de forma. Considerando o exposto optou-se por fazer a deposição dos filmes finos diretamente sobre a fase reforço de um compósito, que depois de laminada seria coberta pela fase matriz, conferindo ao compósito o mesmo aspecto dos utilizados na indústria naval.

Neste sentido, para se obter uma condição mais próxima da descrita no trabalho de Soethe faz-se necessário a utilização de uma fase reforço próxima de um material contínuo, buscando a semelhança com uma folha polimérica. Além disso, fez-se a escolha por um material para a fase matriz que apresentasse impedância ( $Z$ ) semelhante a impedância de espaço livre ( $Z_0$ ), o que maximiza a passagem da radiação incidente no compósito até a fase reforço, facilitando os processos de absorção eletromagnética.

##### 3.1.1. Fibra de Vidro

A escolha da fibra de vidro como fase reforço das amostras do presente trabalho se deu devido à utilização do material na maioria das embarcações fabricadas em compósitos (MARSH, 2013; VASCONCELLOS; LATORRE, 1999).

Nohara (2003) explica que a vasta aplicação de compósitos de fibra de vidro em diversas áreas da engenharia se deve a boa relação peso/resistência e propriedades como: resistência a corrosão e bom isolamento térmico e sonoro.



O trabalho de Folgueras e Rezende (2006) afirma que derivados de fibra de vidro apresentam característica de transparência a radiação eletromagnética na faixa de radar, porém quando combinados com materiais magnéticos ou dielétricos podem passar a se comportar como absorvedores. A transparência da estrutura externa a radar não resolve o problema de detecção das embarcações, pois não há o isolamento dos equipamentos internos, que ficam passíveis de refletir a radiação transmitida pela estrutura.

Para a definição do tipo de fibra de vidro a ser empregada neste trabalho, foi consultado o site do fabricante Owens Corning, visando encontrar um material que apresentasse alta uniformidade superficial. A fibra de vidro pode ser fornecida em forma de fio (roving direto), fibras picadas e na forma de tecidos, costurados com fios têxteis ou tramados com as próprias fibras em diferentes direções.

Em razão da necessidade de um substrato uniforme, ou contínuo, o tipo de fibra de vidro escolhido para a confecção das amostras foi um tecido biaxial de 330g/m<sup>2</sup>, do tipo tela, que apresenta trama fechada e não utiliza fios têxteis para unir as duas direções das fibras. A Figura 13 apresenta uma imagem do material escolhido como substrato para os filmes finos absorvedores.

Figura 13 – Detalhe da malha do tecido de fibra de vidro utilizado na confecção das amostras.



Fonte: Autor

### 3.1.2. Resina Epóxi

As matrizes mais utilizadas na fabricação de embarcações de compósito são as poliméricas termorrígidas de poliéster e epóxi. Segundo Singha e Singha (2012) as resinas poliéster são as mais baratas, simples de utilizar e apresentam propriedades aceitáveis para

muitas aplicações navais, entretanto, as resinas epóxi apresentam o melhor desempenho na relação peso/resistência, além de conferir ao laminado uma superfície mais uniforme e menos suscetível a trincas durante a cura (HOGE;LEACH, 2012).

Simões (2005) apresenta um estudo de absorção eletromagnética de um compósito de resina epóxi com adição de ferritas de Ba e MnZn. Para esse estudo, foram medidas as magnitudes de reflexão, transmissão e absorção eletromagnética de uma amostra de resina epóxi pura na faixa de frequência de 8 a 12GHz. O resultado obtido demonstra que na faixa de frequência de estudo, em média a resina reflete 26,9%, transmite 70,8% e absorve 2,3% da radiação incidente, sendo assim classificada como um material transparente a radiação eletromagnética na faixa avaliada.

Considerando o exposto, buscando conferir ao compósito uma superfície mais uniforme e com baixa magnitude de reflexão eletromagnética da fase matriz, optou-se por utilizar resina epóxi para a laminação das amostras.

A partir desta definição, buscou-se um tipo resina epóxi adequada para laminação manual, com baixa viscosidade e longo tempo de trabalho. A resina escolhida foi a HEC 010, fabricada pela empresa Hard, que também especificou o endurecedor adequado para a aplicação, no caso, o endurecedor HEH 2000. As características do processo de cura e as propriedades da resina antes e depois da cura estão contidas nas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente.

Tabela 2 – Características do processo de cura da resina

	Unidade	Resina HEC 010_Endurecedor HEH 2000
Proporção de mistura em massa	g	Cada 100 g de resina, 20 g de endurecedor
Pot Life 25°C <sup>(1)</sup> (100 ml, 40 mm, 25°C)	min	30 - 35
Pico exotérmico (100 ml, 40 mm, 25°C)	°C	170 - 190
Tempo de gel (15 ml, 6 mm, 25°C)	min	90 - 120
Desmoldagem (100 ml, 40 mm, 25°C)	h	8 - 10
Pós-cura (60°C) <sup>(2)</sup>	h	10 - 15
Espessura recomendada	mm	5

(1) Tempo de trabalho

(2) Opcional para atingir melhores propriedades mecânicas

Fonte: Boletim técnico fornecido pelo fabricante.

Tabela 3 – Propriedades da resina e endurecedor antes da cura

	Norma	Unidade	Resina HEC 010_Endurecedor HEH 2000
Cor	-	-	Amarelo Claro
Temp. máx. de operação recomendada	-	°C	60
Resistência à flexão	ASTM D 790	MN/m <sup>2</sup>	95 - 100
Resistência à compressão	ASTM D 695	MN/m <sup>2</sup>	145 - 150
Resistência à tração	ASTM D 638	MN/m <sup>2</sup>	50 - 60

Fonte: Boletim técnico fornecido pelo fabricante.

Tabela 4 – Propriedades do sistema resina-endurecedor após a cura

	Norma	Unidade	Resina HEC 010	Endurecedor HEH 2000
Cor	-	-	Incolor	Amarelo claro
Densidade	ASTM D 1475	g/cm <sup>3</sup>	1,04 – 1,08	0,99 – 1,01
Viscosidade	-	mPa.s	1200 - 1700	130 -150
Consistência	-	-	Líquido	Líquido
Base química	-	-	Epóxi	Mistura de aminas

Fonte: Boletim técnico fornecido pelo fabricante.

### 3.1.3. Filmes Finos de Titânio

O titânio é citado em trabalhos como Saville (2005), Soethe et al (2011) e Soethe (2009) como um bom material para aplicações em absorvedores de radiação eletromagnética, devido a sua alta permissividade elétrica. Soethe et al (2011) observou valores de até 50% de absorção de radiação nas frequências na faixa de 8 a 12GHz em um filme fino de titânio com espessura de 15 nm depositado sobre um polímero.

Além das propriedades eletromagnéticas, Martin, Tismer e Hoche (2015) ressaltam que o titânio apresenta alta resistência mecânica e alta resistência a corrosão, favorecendo sua aplicação em ambientes severos.

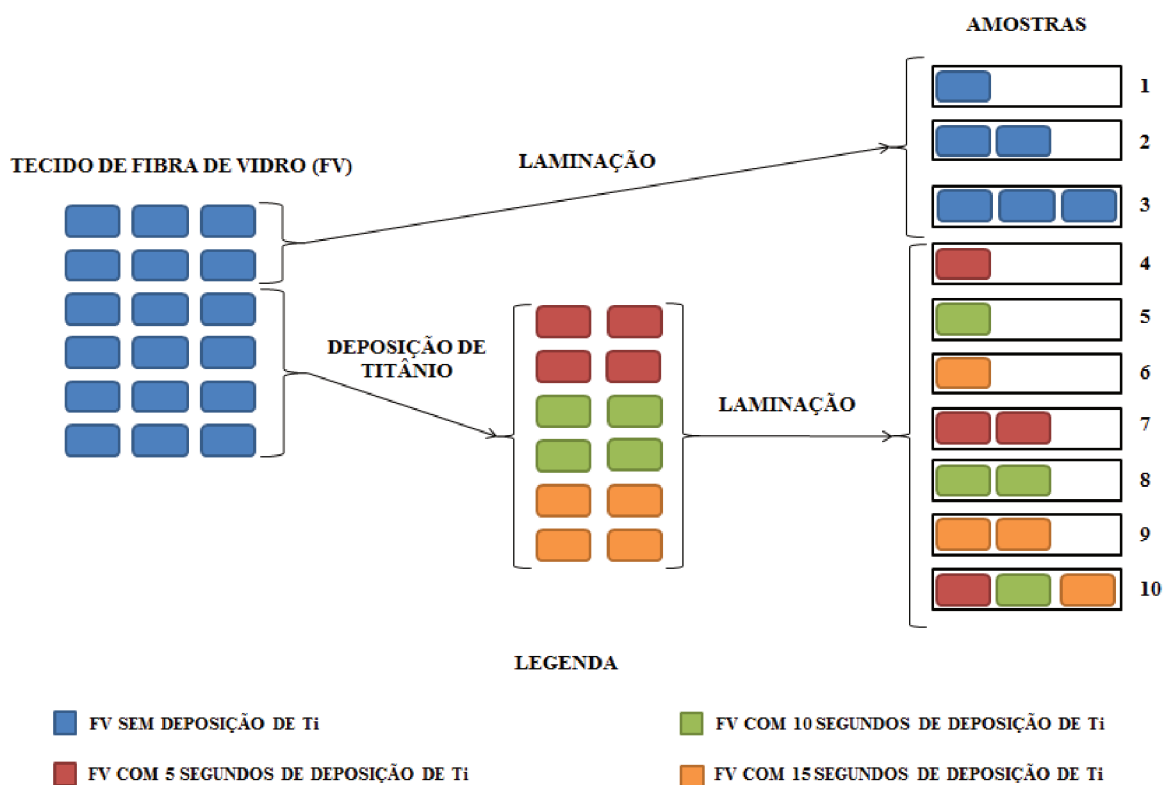
Considerando o alto potencial do material como absorvedor e suas propriedades favoráveis a aplicação em ambiente marítimo, o titânio foi escolhido para ser depositado sob forma de filmes finos no presente trabalho.

### 3.2. MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os procedimentos experimentais e os equipamentos utilizados para a confecção e realização dos testes das amostras produzidas.

Foram confeccionadas amostras de compósito de resina epóxi reforçada com fibra de vidro. Com a finalidade de entender a influência do número de camadas de fibra de vidro, e a espessura dos filmes de titânio na magnitude de absorção eletromagnética do compósito, foram fabricadas dez amostras, com diferentes combinações destes parâmetros, como apresentado esquematicamente na Figura 14.

Figura 14 – Metodologia utilizada para fabricação das amostras



Fonte: Autor.

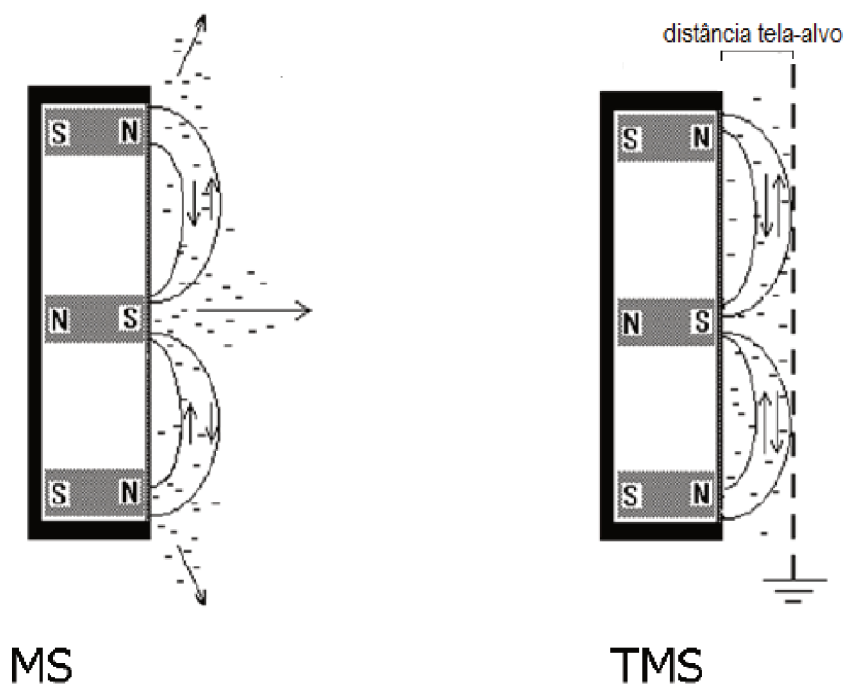
#### 3.2.1. Deposição de Titânio por Triodo Magnetron Sputtering

Conforme o exposto anteriormente, o método de deposição de filmes por Sputtering consiste na transferência de átomos de um metal base (alvo) até o substrato por meio de um bombardeio de íons na superfície do alvo.



O Triodo Magnetron Sputtering (TMS) é um sistema de deposição descrito em Fontana e Muzart (1998), que prevê algumas alterações no sistema de Magnetron Sputtering, sendo a principal a inserção de uma tela entre o metal base e o substrato da deposição. Essa alteração contribui para um melhor controle das variáveis do processo, como tensão, corrente e temperatura (FONTANA;MUZART, 1998). Na Figura 16 pode-se observar um esquema evidenciando o aprisionamento dos elétrons nos sistemas de Magnetron Sputtering e Triodo Magnetron Sputtering.

Figura 16 – Esquema do aprisionamento de elétrons nos processos de Magnetron Sputtering (MS) e; Triodo Magnetron Sputtering (TMS)



Fonte: SAGÁS et al, 2007, p. 1

As deposições de titânio sobre o tecido de fibra de vidro foram realizadas em um equipamento de TMS localizado no Laboratório de Plasma do Departamento de Física da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).

O equipamento consiste em uma câmara cilíndrica com 30 cm de diâmetro por 25 cm de altura, que possui uma tampa na qual, na parte interna ficam fixados os ímãs, o alvo e a tela característica do TMS, e na parte externa ficam fixados os sensores de pressão e uma tomada de água para a refrigeração dos ímãs. A câmara também possui uma tomada

para o gás de trabalho e uma janela de observação. O substrato é posicionado dentro da câmara em um suporte que contém uma cobertura rotativa com sistema abre-fecha externo. Tal cobertura permite um melhor controle do tempo e da qualidade da deposição no substrato, visto que é necessário um período de tempo até que o plasma se estabilize assim que a diferença de potencial é aplicada. Durante esse tempo mantém-se a cobertura por cima do substrato, o que impede a deposição e somente após a fixação dos parâmetros de estudo é feita a exposição das amostras ao plasma iniciando o processo de metalização. A Figura 17 evidencia uma imagem contendo os principais componentes desse equipamento.

Figura 17 – Triodo Magnetron Sputtering da UDESC. A) Tampa da câmara; B) Câmara.



Fonte: Autor.

Para obter-se pressões na ordem de  $10^{-6}$  Torr, a câmara é vedada e são utilizadas duas bombas ligadas em série, uma mecânica e uma turbomolecular. A alimentação elétrica é provida por uma fonte de tensão constituída por um controlador de voltagem, um transformador e uma ponte de diodos retificadora de onda completa. Nessa configuração é possível se obter tensões entre 0 a 1000 V e correntes entre 0 a 10 A, dependendo da distância tela/alvo (SOETHE, 2009).

A regulação do equipamento para as deposições de titânio sobre fibra de vidro foi baseada nos parâmetros de processos definidos em Soethe (2009) para deposição de titânio sobre polímeros, utilizando argônio como gás de trabalho. Os parâmetros utilizados para a metalização das amostras são apresentados na Tabela 5. Desses parâmetros, apenas os tempos de deposição foram alterados, pois a literatura demonstra que os filmes obtidos

com a menor espessura (15nm) apresentaram o maior índice de absorção eletromagnética, revelando uma tendência a obtenção de maiores índices de absorção com a redução da espessura dos filmes. Considerando o exposto, buscou-se produzir filmes com espessuras em torno de 15nm, definindo tempos de deposição menores ao especificado pelo trabalho de referência.

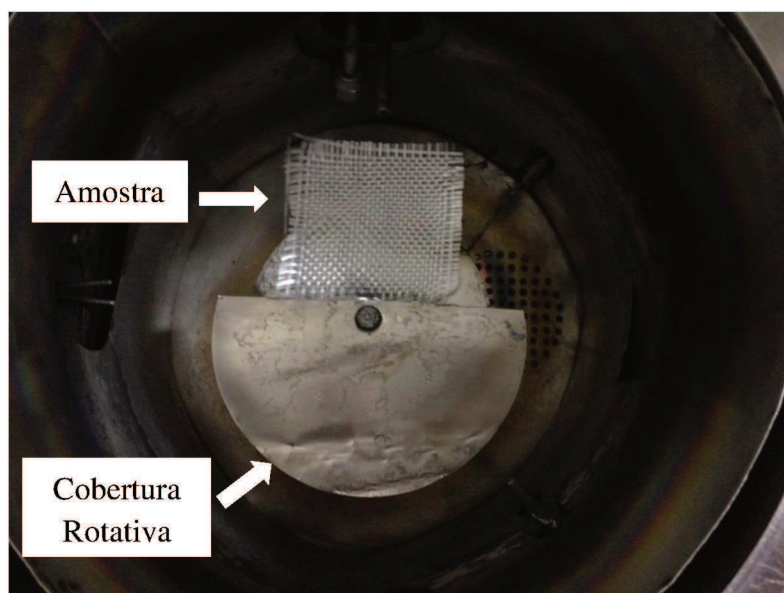
Tabela 5 – Parâmetros de deposição de Ti por TMS utilizado no trabalho

Tempo de Deposição (s)	Corrente (A)	Tensão (V)	p (mTorr)
5, 10 e 15	2	460	2,5

Fonte: Autor

Seguindo o esquema demonstrado na Figura 14, foram preparadas deposições de titânio em 12 (doze) substratos de tecido de fibra de vidro, sendo 4 (quatro) para cada tempo de deposição. Na Figura 18 é possível observar uma imagem de um dos substratos de tecido de fibra de vidro posicionado no suporte dentro da câmara de deposição por TMS.

Figura 18 – Amostra de tecido de fibra de vidro no interior do equipamento de TMS



Fonte: Autor



### **3.2.2. Perfilometria**

De acordo com Tatsch e Damiani (2000) o ensaio de perfilometria consiste na varredura horizontal de uma ponteira sobre a superfície de um substrato, a qual sofre deslocamentos verticais em resposta as características topográficas. Os deslocamentos verticais são amplificados, processados e mostrados em um monitor de vídeo, traçando um perfil da superfície do substrato.

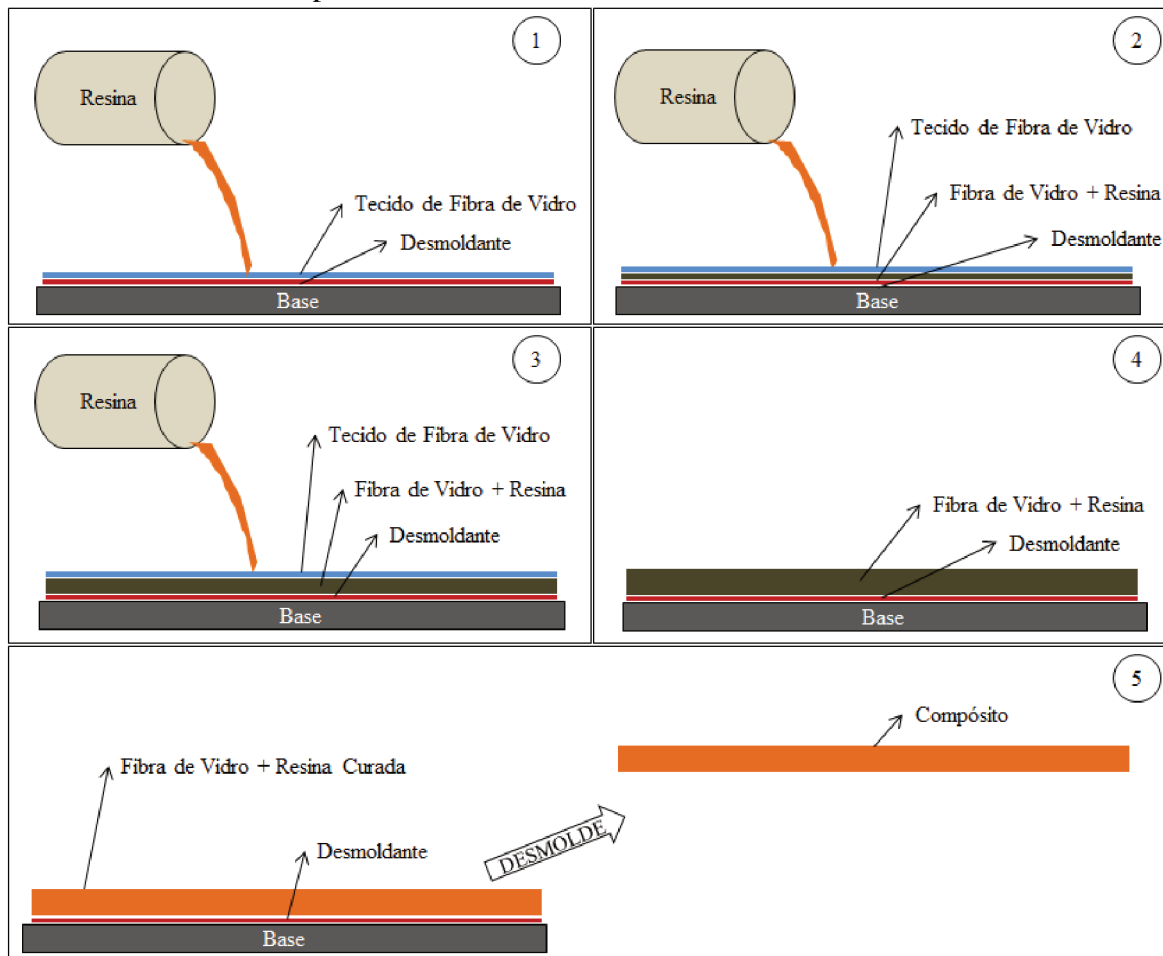
Para se obter a espessura dos filmes depositados nos tecidos de fibra de vidro, foi efetuado um ensaio de perfilometria em uma amostra de silício, a qual foi inserida em uma das deposições de titânio efetuadas para o presente trabalho. O silício foi utilizado devido a sua baixa rugosidade, que favorece a identificação da espessura de filmes muito finos em sua superfície. Para isso, incluiu-se uma pequena amostra de silício ao lado de uma amostra de tecido de fibra de vidro que foi metalizada com titânio durante 5 segundos. A amostra de silício teve metade de sua superfície coberta com uma fita adesiva, a qual foi retirada após a deposição, com a intenção de revelar o ‘degrau’ correspondente a espessura do filme de titânio. A identificação da espessura no substrato de silício é associada à espessura dos filmes depositados sobre as amostras de fibra de vidro, e é envolvida no cálculo da taxa de deposição, dada em nanômetros por segundo, para determinar a espessura para diferentes tempos de exposição. Para o ensaio, foi utilizado o perfilômetro de ponteira localizado no laboratório de metrologia da UDESC, com apoio do professor Dr. Julio Cesar Sagás.

### **3.2.3. Fabricação dos Compósitos**

Para a obtenção dos compósitos de fibra de vidro e resina epóxi foi utilizado o método de laminação manual, que é o método mais utilizado para a fabricação de compósitos de fibra de vidro planos com multi-camadas (laminados) (FREIRE, 2001). Para isso, as amostras de fibra de vidro foram dispostas na configuração desejada em uma superfície de vidro, a qual foi previamente lubrificada por um desmoldante. Fez-se a mistura da resina com o agente endurecedor, a qual foi aplicada nas amostras com um pincel, sendo posteriormente compactada por um rolo de metal com a intenção de remover eventuais bolhas de ar. Nos compósitos que utilizaram mais de uma camada de fibra de

vidro, a resina foi aplicada e compactada a cada camada, como mostra em sequência o esquema da Figura 19. Após a cura da resina, os compósitos foram desmoldados da base de vidro.

Figura 19 – Esquema ilustrando a sequência do processo de laminação manual de um compósito utilizando três camadas de fibra de vidro.

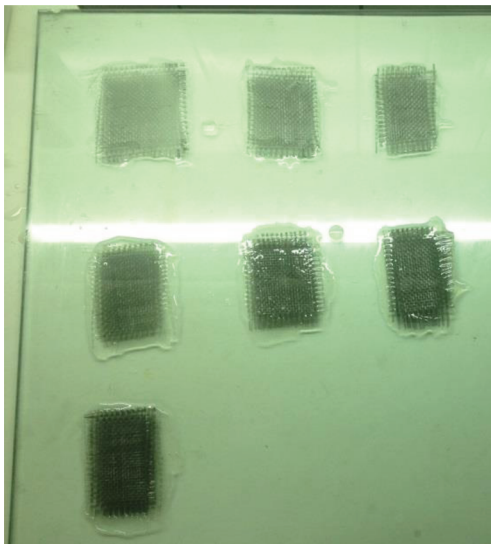


Fonte: Autor

Com a intenção de entender a influência da inserção de mais de uma camada de fibra com deposição de Ti no índice da absorção do compósito, foram laminadas 10 amostras, com uma, duas e três camadas de fibra de vidro com diferentes tempos de deposição e sem deposição, para referência. O esquema da Figura 14 demonstra o número e o tempo de deposição das camadas das 10 amostras de compósito fabricadas para o presente trabalho.

Foi utilizada a proporção em massa de aproximadamente 70% de resina para 30% de fibra. A Figura 20 apresenta uma imagem de sete das dez amostras durante o processo de laminação manual.

Figura 20 – Amostras durante o processo de laminação



Fonte: Autor

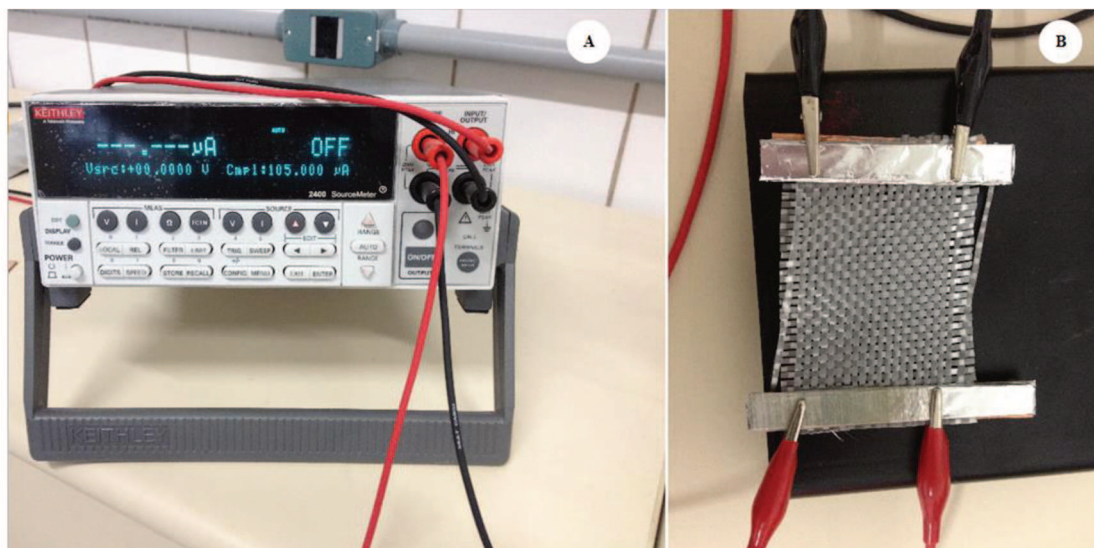
#### 3.2.4. Microscopia Eletrônica

Com o intuito de visualizar a superfície do filme de titânio depositado sobre o tecido de fibra de vidro, foi feita uma análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por meio de um equipamento da marca LEO, modelo 435 VPI, localizado na Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), pertencente ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (CTA) em São José dos Campos. Nesta análise, é possível observar a forma com que o filme de titânio aderiu a superfície das fibras de vidro bem como a homogeneidade do revestimento. Para a observação em MEV dos filmes sobre a fibra foi utilizada uma amostra de tecido de fibra de vidro com 15 segundos de deposição de titânio, sem laminação com resina epóxi. Para a visualização da interface filme/fibra foram utilizados aumentos de até 37000X.

### 3.2.5. Resistividade

Com o objetivo de entender a influência do filme metálico no comportamento elétrico do compósito, as quais podem influenciar a maneira na qual o material interage com uma radiação eletromagnética incidente (SOETHE, 2009), realizaram-se medidas da resistividade elétrica de uma amostra de fibra de vidro pura, e uma outra com 15 segundos de deposição de titânio. Estas medidas foram realizadas no Laboratório de Filmes Finos e Nanotecnologia da Universidade Federal de Santa Catarina, com auxílio do professor Dr. Rafael Galina Delatorre. O teste foi conduzido em um equipamento que gera tensões em um intervalo escolhido pelo usuário, e mede a respectiva corrente conduzida entre os pólos, que são fixados na amostra. Foi utilizada a técnica de resistividade por 2 pontas, para isso, os pólos negativo e positivo do equipamento foram fixados nas extremidades opostas das amostras, utilizando-se uma barra de material condutor para garantir o melhor contato do pólo com o material. A Figura 21 ilustra o equipamento utilizado para o ensaio, bem como a fixação dos pólos, em forma de grampos, nas amostras. Foram inseridos dois grampos adicionais, apenas para a melhor fixação mecânica da barra condutora na amostra.

Figura 21 – Ensaio de resistividade elétrica. A) Equipamento; B) Conexão.



Fonte: Autor

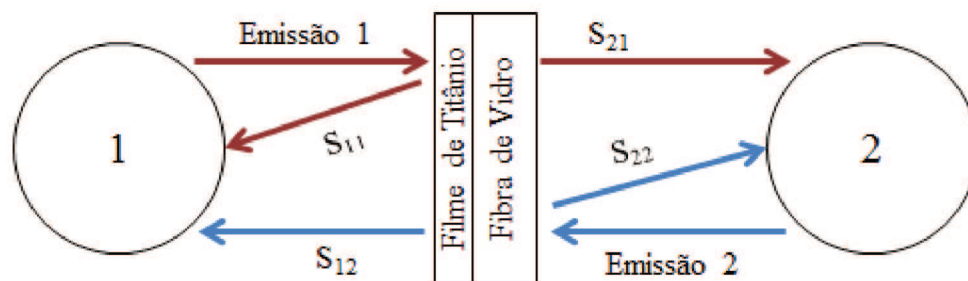
### 3.2.6. Caracterização por Guia de Onda

As amostras de compósitos obtidos pelo processo de laminação com resina epóxi e fibra de vidro, mostradas esquematicamente na Figura 14, foram caracterizados quanto a absorção eletromagnética na faixa de frequências de micro-ondas, usualmente utilizada em aparelhos de radar (8 a 12GHz). Essa caracterização foi feita a partir da obtenção dos dados de energia transmitida ( $E_t$ ) e energia refletida ( $E_r$ ) pela amostra quando exposta à radiação na faixa de frequência de interesse. Do princípio da conservação de energia, temos que a energia incidente ( $E_i$ ) em um material deve ser igual a soma das parcelas de energia transmitida ( $E_t$ ), refletida ( $E_r$ ) e absorvida ( $E_a$ ), como demonstra a Equação 9. Conhecidas as parcelas  $E_i$ ,  $E_t$ , e  $E_r$  é possível se obter a  $E_a$ .

$$E_i = E_t + E_r + E_a \quad (9)$$

Para esta caracterização, foi utilizado o método de guia de onda, que consiste em um guia metálico que confina a radiação eletromagnética no espaço onde a amostra é posicionada. Para o ensaio, foi utilizado um guia de onda do Laboratório de Caracterização Eletromagnética do AMR/IAE/CTA em São José dos Campos. Nesse equipamento o guia de onda é acoplado a um analisador de rede vetorial, modelo 8510C, do fabricante Agilent Technologies, que é conectado a um gerador de frequências e a um equipamento S-parameter Test Set Hewlett Packard 8515 A. Para a avaliação das magnitudes de reflexão, transmissão e absorção eletromagnética, foi utilizado o software da Agilent Technologies, que informa as amplitudes e fases dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  (coeficientes de reflexão e transmissão pela frente da amostra) e também dos parâmetros  $S_{22}$  e  $S_{12}$  (coeficientes de reflexão e transmissão pelo verso da amostra). O equipamento conta com duas portas que emitem e recebem radiação refletida ou transmitida pela amostra através do guia de onda. Essas portas são interligadas pelo guia de onda, onde a amostra é fixada, garantindo que toda a radiação emitida atinja a amostra e as parcelas de energia refletida e transmitida possam ser devidamente medidas. As amostras foram cortadas de modo a permitir a fixação adequada no guia de onda, e foram dispostas com a face que recebeu a deposição de titânio voltada para a Porta 1, para o posterior estudo comparativo entre a absorção de frente e de verso do material. O esquema ilustrativo da obtenção dos parâmetros S é apresentado na Figura 22.

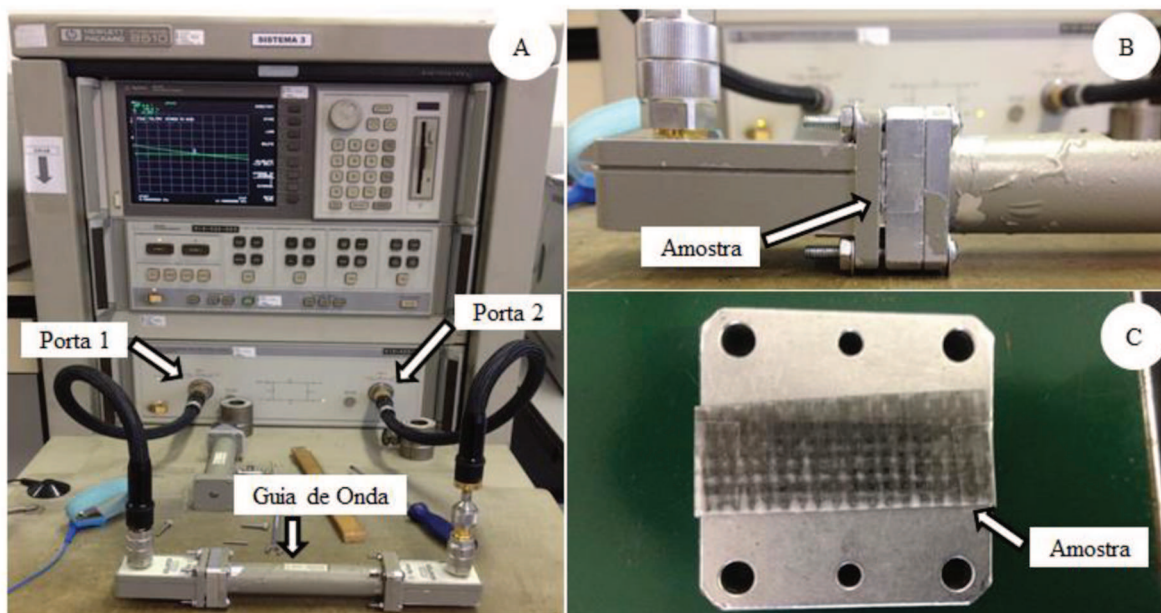
Figura 22 – Esquema ilustrativo dos parâmetros S, obtidos no ensaio de guia de onda



Fonte: Autor

A Figura 23 evidencia o arranjo experimental do equipamento utilizado para a caracterização da absorção eletromagnética das amostras.

Figura 23 – Equipamento de caracterização eletromagnética por guia de onda. A) Analisador vetorial de espectro evidenciando o aparato experimental utilizado nas medidas; B) Guia de onda com amostra fixada; C) Disposição da amostra no guia de onda.



Fonte: Autor

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados e as discussões referentes aos temas de estudo do presente trabalho, focando no esclarecimento dos tópicos listados abaixo:

- Avaliação da espessura dos filmes de Ti sobre substrato de fibra de vidro;
- Avaliação da morfologia da deposição de Ti sobre fibra de vidro através de análise por imagem;
- Avaliação da influência do filme de Ti nas propriedades elétricas intrínsecas do tecido de fibra de vidro;
- Avaliação da absorção eletromagnética dos compósitos obtidos;
- Avaliação da influência da espessura dos filmes e do número de camadas de fibra no índice de absorção dos compósitos, e;
- Comparação do percentual de energia absorvida pela frente e pelo verso dos compósitos obtidos.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESPESSURA DOS FILMES

O ensaio de perfilometria, como mencionado na seção 3.2.2., foi realizado em uma amostra de silício que recebeu 5 segundos de deposição de Ti. A intenção do ensaio é a verificação da espessura do filme depositado no silício, que é considerado um material padrão devido a baixa rugosidade, para então se obter a taxa de deposição de Ti no substrato. Esta taxa de deposição pode ser empregada para todas as amostras uma vez que as mesmas condições de deposição foram utilizadas em todas as metalizações.

Após a medida, verificou-se que o perfilômetro indicou uma espessura média de 7 nm para o filme de Ti depositado sobre a amostra de silício, correspondente a uma deposição de 5 segundos. Através desse valor, a taxa de deposição calculada para o processo é igual a 1,4 nm/s. Para isso, assume-se uma taxa constante de deposição em função do tempo, o que é previsto no trabalho de Soethe (2009).

Com a taxa obtida, é possível estimar a espessura dos filmes depositados sobre fibra de vidro com 5, 10 e 15 segundos de deposição, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Espessura dos filmes de Ti obtidos em função do tempo de deposição.

Tempo de Deposição (s)	Espessura do Filme (nm)
0	0
5	7
10	14
15	21

Fonte: Autor

No entanto, podem ocorrer pequenas discrepâncias em termos da espessura dos filmes depositados no substrato de fibra de vidro e de silício. Isto se deve as diferenças da estrutura de ambas as superfícies, sendo que a amostra de Si é plana e contínua e a fibra de vidro apresenta uma superfície irregular, composta por conjuntos de filamentos tramados em direções perpendiculares.

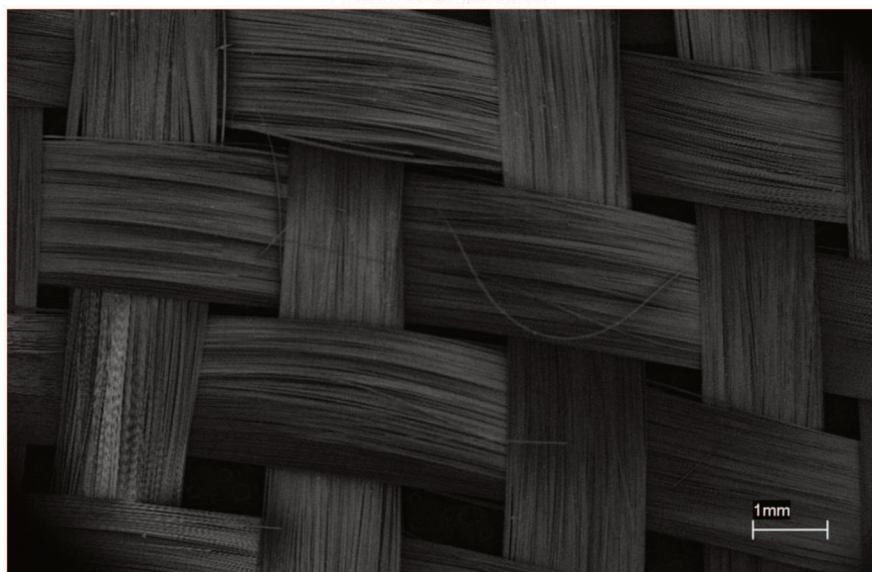
#### 4.2. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

Buscando analisar a morfologia do filme de Ti depositado sobre a fibra de vidro, foi realizada a análise por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em uma amostra de fibra de vidro com 15 segundos de deposição de Ti.

A Figura 24 apresenta uma imagem obtida por MEV da superfície da fibra de vidro com um aumento de 32X. Com esse aumento, é possível observar que o filme de Ti encontra-se distribuído de forma homogênea sobre as fibras tramadas. Esta imagem permite identificar milimetricamente o substrato, visualizando o formato das tramas e fios isoladamente.



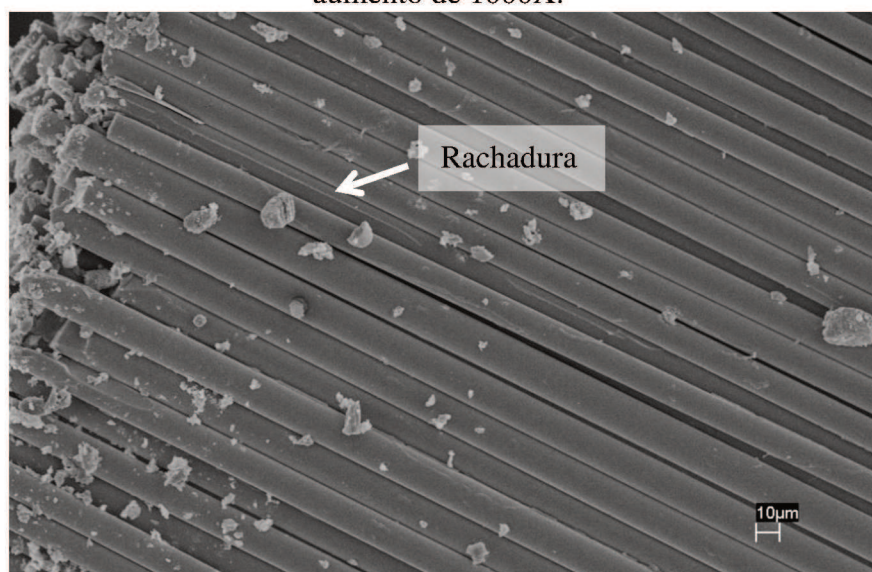
Figura 24 – Imagem de MEV de amostra de fibra de vidro com deposição de Ti, com aumento de 32x.



Fonte: Autor

Na Figura 25 é possível observar a superfície das fibras isoladamente, em uma imagem com aumento de 1000X. Nessa imagem é possível visualizar alguns pedaços de fibra que se espalharam pela superfície devido ao corte da amostra. Também é possível a identificação de pequenas rachaduras na superfície de algumas das fibras que podem estar associadas a presença de um recobrimento fino contínuo.

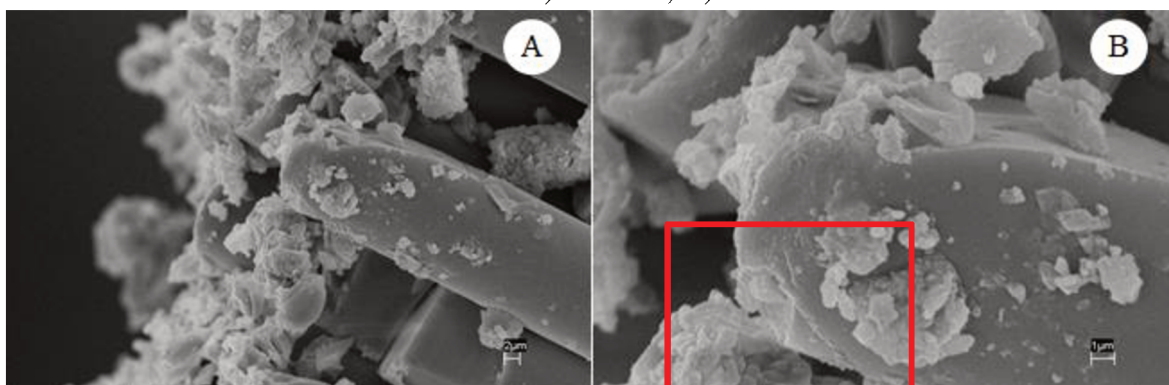
Figura 25 - Imagem de MEV de amostra de fibra de vidro com deposição de Ti, com aumento de 1000X.



Fonte: Autor

Na Figura 26 é possível observar, com aumentos de 5000x e 15000x, a interface do filme de Ti com a fibra de vidro localizada na extremidade de um dos filamentos de fibra de vidro. Também se constata que o recobrimento de Ti foi depositado na superfície dos filamentos de vidro um a um, não formando um filme contínuo por toda a superfície da amostra.

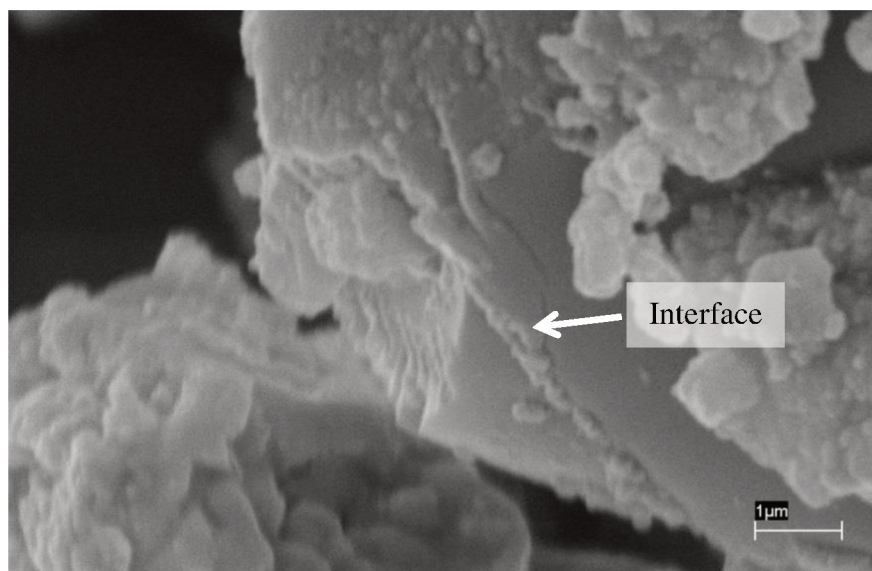
Figura 26 - Imagem de MEV de amostra de fibra de vidro com deposição de Ti, com aumento de: A) 5000x e; B) 15000x.



Fonte: Autor

A Figura 27 apresenta uma ampliação da Figura 25(B), na região indicada, com aumento de 37000X. Mesmo com essa magnitude de ampliação não foi possível medir com precisão a espessura do filme, apenas afirmar que esta deve possuir dimensões na ordem de poucas dezenas de nanômetros. Outra observação que pode ser feita avaliando a Figura 26 é a presença de uma fratura frágil na superfície que reveste a fibra. Isto evidencia que este material se trata de um revestimento metálico, indicando a presença do filme.

Figura 27 - Imagem de MEV de amostra de fibra de vidro com deposição de Ti, com aumento de 37000x.



Fonte: Autor.

#### 4.3. CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

De modo a avaliar se a presença do filme de Ti provocou alguma alteração na maneira com a qual o tecido de fibra de vidro conduz corrente elétrica e entender a relação dessa propriedade com a absorção eletromagnética, foi realizado o ensaio de resistividade elétrica em um tecido revestido com um filme de Ti com de 21 nm. Além disso, para fins de comparação, foi feita a mesma análise em um tecido de fibra sem deposição de Ti.

Para o ensaio, o equipamento foi configurado de forma a atuar como um gerador de tensão, fazendo uma varredura de 20 pontos de tensão prescrita em um intervalo de -1 a 1 Volt, medindo a respectiva corrente elétrica entre os pólos positivo e negativo, fixados em extremidades opostas do material. Com os valores de tensão (V) e corrente (I) é possível realizar o cálculo da resistência (R) através da Equação 10.

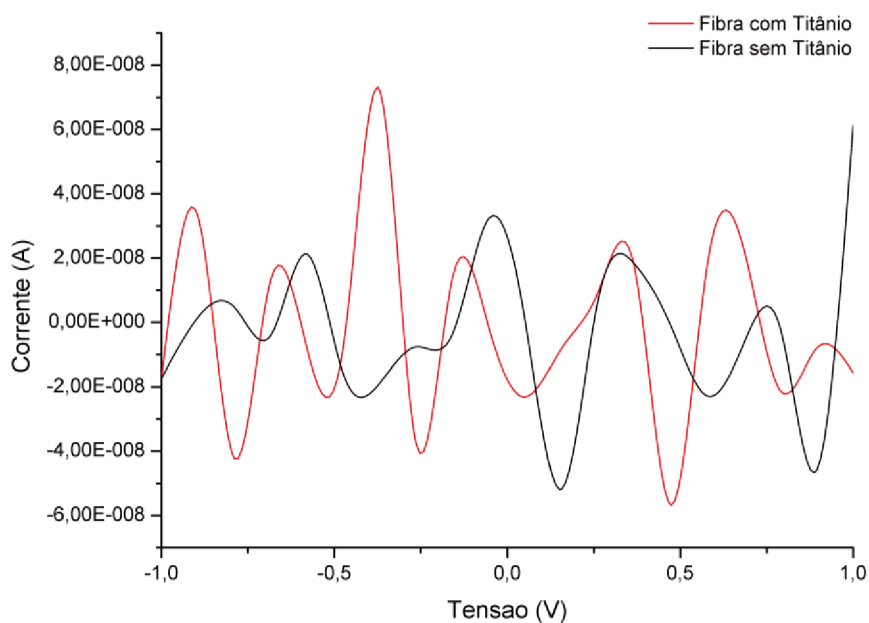
$$R = V/I \quad (10)$$

A resistividade ( $\rho$ ) é então obtida ao multiplicar a resistência pela área da seção (A) transversal do material, e dividi-la pelo comprimento do material (l) entre os pólos do equipamento de medição, como mostra a Equação 11.

$$\rho = R * A/l \quad (11)$$

A fim de uma análise comparativa qualitativa, tendo em vista a dificuldade do real dimensionamento das seções transversais tanto do tecido de fibra de vidro quanto do filme de Ti, as duas amostras foram preparadas com o mesmo comprimento, e foram assumidas espessuras idênticas. Com isso, a comparação poderia ser feita em termos de resistência (R). Soethe (2009) afirma que a resistividade é uma medida de oposição a passagem de corrente no material, portanto, pode-se assumir que quanto maior o valor dessa grandeza, mais característica de isolante elétrico o material apresenta. De acordo com Vaughan (1998), o tecido de fibra de vidro é um material isolante elétrico, com R da ordem de centenas de milhares de  $\Omega$ . Por outro lado, o titânio apresenta característica condutora, com R da ordem de milésimos de  $\Omega$ , o que levaria a crer que os valores de resistência elétrica da fibra de vidro sem deposição de Ti sejam mais altos que os valores para a amostra com deposição metálica. O gráfico contendo os resultados de corrente *versus* tensão apresentado pelas duas amostras testadas pode ser observado na Figura 28.

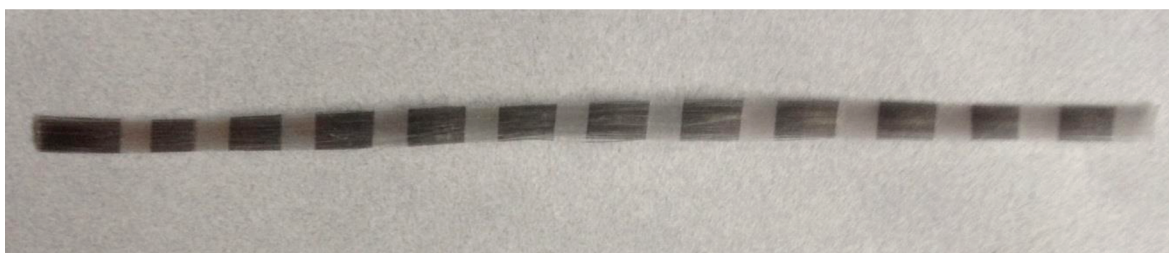
Figura 28 - Análise do comportamento elétrico dos tecidos de fibra de vidro com e sem filme de Ti



Fonte: Autor

Os resultados apresentados no gráfico demonstram que o comportamento elétrico da amostra com deposição de Ti não foi alterado em relação à amostra sem deposição, mantendo sua característica isolante, com valores de corrente muito baixos, oscilando, porém centrados em zero durante todo o intervalo de tensões. Tal comportamento pode ser explicado pela característica tramada da superfície da fibra de vidro. Essa estrutura faz com que as fibras de vidro revestidas com Ti devam atuar como fios condutores. Entretanto, verifica-se que a forma como o material é constituído, sob a forma de tramas, promove a geração de uma superfície com ‘ilhas’ de material condutor que não se comunicam entre si devido a característica isolante da fibra de vidro pura. A Figura 29 apresenta um conjunto de fibras unidirecional o qual estava disposto em uma das direções na trama da amostra com deposição de Ti. Nela é possível observar a característica de deposição metálica intermitente, que justifica o resultado de resistividade obtido.

Figura 29 – Trama isolada da malha de fibra de vidro depositada com Ti.



Fonte: Autor

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DOS COMPÓSITOS

As 10 amostras de compósitos confeccionadas, como mencionado na seção 3.2.3., foram testadas quanto a absorção eletromagnética em ambas as faces, na faixa de frequência de 8 a 12 GHz. O equipamento fornece os resultados de absorção em decibéis (dB), porém, para melhor visualização, esses resultados são convertidos em termos de porcentagem de atenuação da energia incidente através da Equação 12.

$$\text{Absorção [\%]} = 100(1 - 10^{0,1\text{dB}}) \quad (12)$$

A Tabela 7 apresenta as especificações quanto ao nome, número de camadas de fibra de vidro (c) e espessura dos filmes (e) utilizados nos compósitos obtidos.

Tabela 7 – Nome e especificações das amostras dos compósitos

Nome da Amostra	No. de Camadas de Fibra	Espessura do Filme (nm)
c = 1; e = 0	1	0
c = 2; e = 0	2	0
c = 3; e = 0	3	0
c = 1; e = 7 nm	1	7
c = 1; e = 14 nm	1	14
c = 1; e = 21 nm	1	21
c = 2; e = 7 nm	2	7
c = 2; e = 14 nm	2	14
c = 2; e = 21 nm	2	21
c = 3; e = 7/14/21 nm	3	7/14/21

Fonte: Autor

Os gráficos contendo os resultados obtidos para a absorção eletromagnética na face frontal dos compósitos se encontra na Figura 30, e os resultados para absorção do verso podem ser observados na Figura 31.

Para melhor identificação no gráfico relativo aos compósitos que utilizaram as fibras de vidro sem deposição de titânio (amostras “c = 1; e = 0”; “c = 2; e = 0” e; “c = 3; e = 0), as linhas referentes a essas amostras se apresentam tracejadas, ao passo que as demais amostras apresentam linhas contínuas.

Nota-se que a amostra “c = 2; e = 7 nm” não aparece nos resultados. Isso se deve a um erro durante a operação do software do equipamento, onde os dados de absorção da amostra “c = 1; e = 21” foram salvos sobre os dados relativos a outra amostra. Erro este, que só foi percebido na etapa de análise dos resultados.

Figura 30 – Curvas de absorção eletromagnética na face frontal dos compósitos

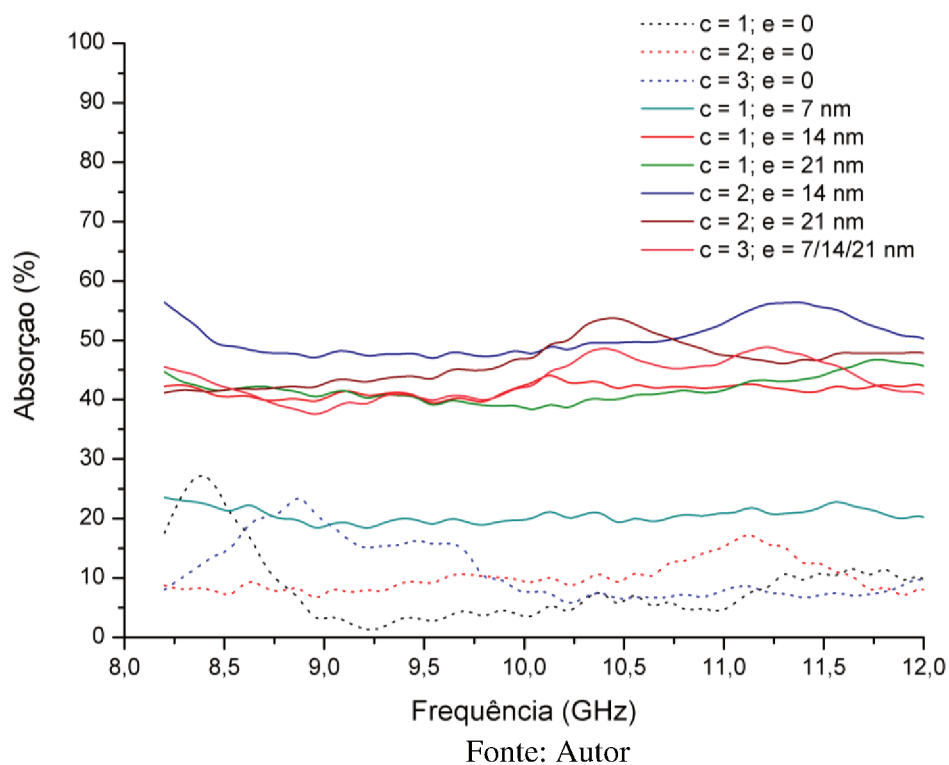
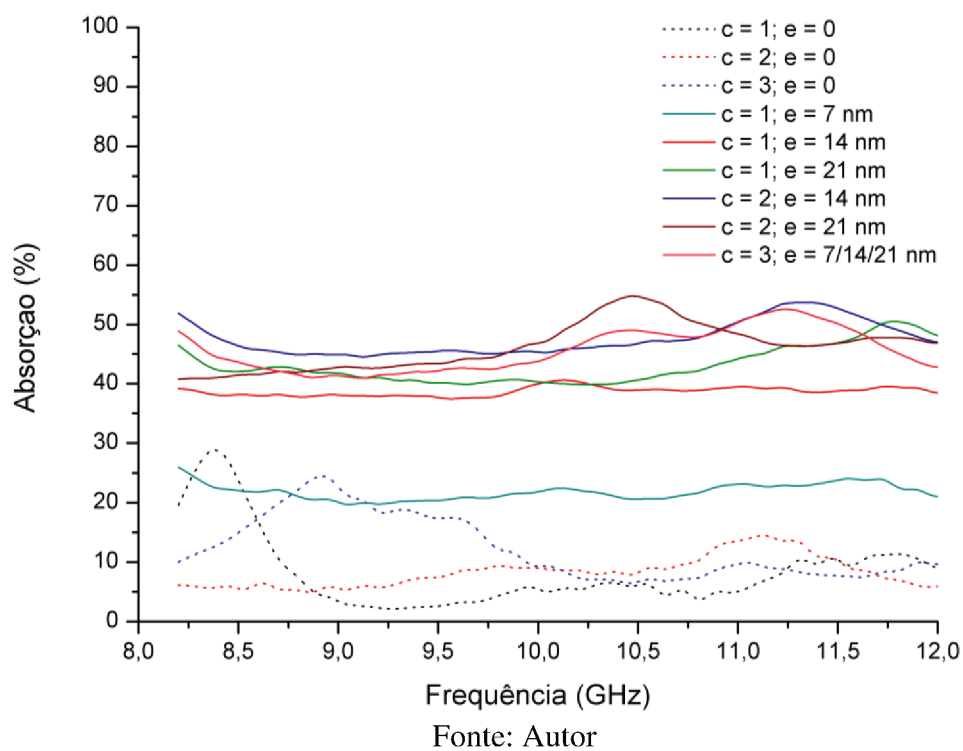


Figura 31 – Curvas de absorção eletromagnética no verso dos compósitos



Analisando o gráfico da Figura 30 é possível observar que os compósitos laminados com fibras de vidro que receberam deposição de Ti apresentam níveis de absorção notavelmente maiores que os compósitos que utilizaram fibra de vidro pura. Com exceção da amostra “ $c = 1$ ;  $e = 7$  nm”, todos os compósitos com deposição de Ti apresentaram níveis de atenuação da energia incidente na ordem de 40% em todo o intervalo de frequências, enquanto as demais amostras apresentaram níveis de atenuação na ordem de 10%, com picos estreitos de 20%. Nessa configuração, a amostra que apresentou o maior pico de absorção foi a “ $c = 2$ ;  $e = 14$  nm” que na frequência de 8,2GHz absorveu 56,4% da energia incidente. Essa amostra também apresentou a maior média de absorção eletromagnética na faixa de frequência testada, igual a 50,14%.

O gráfico da Figura 31 demonstra que houve um comportamento de absorção no verso semelhante ao da face frontal, tal comportamento sugere que a posição do filme de Ti dentro do laminado pouco influencia a capacidade de absorção do compósito. Nessa configuração, a amostra que apresentou o maior pico de absorção foi a “ $c = 2$ ;  $e = 21$  nm”, absorvendo 54,79% da energia incidente na frequência de 10,468 GHz, no entanto, a amostra que apresentou a maior média de absorção no verso foi a “ $c = 2$ ;  $e = 14$  nm”, obtendo uma média de absorção de 47,37% da energia incidente.

De acordo com Soethe (2009) o comportamento de absorção eletromagnética observado nas amostras do presente trabalho é característico de absorvedores do tipo banda larga, também conhecidos como *wideband* (W), onde há absorção em uma grande faixa de frequências, sem a ocorrência de picos pronunciados. Segundo a autora, os absorvedores do tipo W são ideais para aplicações de tecnologia furtiva, devido a absorção em toda a faixa de frequência do equipamento de identificação. Absorvedores que apresentam picos de absorção em pequenas faixas de frequência são conhecidos como absorvedores de banda estreita, ou *narrowband* (N).

A Tabela 8 apresenta a média de absorção, o pico de absorção, a frequência correspondente ao pico e o desvio padrão dos níveis de absorção obtidos nas amostras.



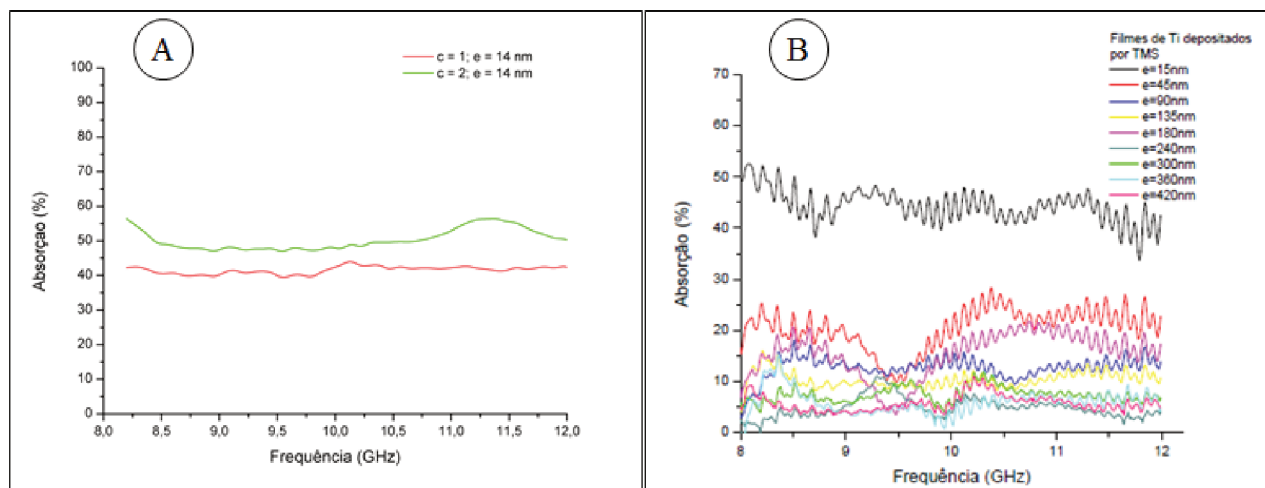
Tabela 8 – Dados das curvas de absorção eletromagnéticas dos compósitos

Nome da Amostra	Posição	Atenuação Média (%)	Atenuação Máxima (%)	Frequência de Atenuação Máxima (GHz)	Desvio Padrão (%)
c = 1; e = 0	Frente	8.14	27.15	8.37	5.88
	Verso	8.10	28.76	8.37	6.17
c = 2; e = 0	Frente	9.81	15.66	11.22	2.63
	Verso	8.01	14.45	11.14	2.61
c = 3; e = 0	Frente	10.71	23.42	8.87	4.85
	Verso	11.80	24.09	8.96	5.23
c = 1; e = 7 nm	Frente	20.38	23.56	8.20	1.30
	Verso	21.70	26.00	8.20	1.40
c = 1; e = 14 nm	Frente	41.42	44.07	10.13	1.12
	Verso	38.54	40.62	10.13	0.94
c = 1; e = 21 nm	Frente	41.89	46.62	11.81	2.16
	Verso	43.37	50.43	11.81	3.11
c = 2; e = 14 nm	Frente	50.14	56.40	8.20	2.96
	Verso	47.37	53.67	11.31	2.76
c = 2; e = 21 nm	Frente	46.19	53.70	10.47	3.30
	Verso	46.17	54.79	10.47	3.67
c = 3; e = 7/14/21 nm	Frente	42.94	48.84	11.22	3.33
	Verso	45.30	52.54	11.22	3.56

Fonte: Autor

Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com o estudo realizado por Soethe (2009) é possível observar que o comportamento de absorção dos filmes de Ti em um substrato de fibra de vidro, laminado com resina epóxi foi semelhante ao comportamento observado para as deposições de Ti em um substrato polimérico contínuo. A Figura 32 apresenta um gráfico retirado do trabalho de Soethe (2009) contendo os valores de absorção de filmes de Ti com espessuras variando de 15 a 420 nm e um gráfico obtido com os valores de absorção dos compósitos laminados com uma e duas camadas de fibras com 14 nm de filme de Ti. Comparando a curva de absorção do filme de 15 nm de Ti depositado sobre polímero, com as curvas dos compósitos contendo fibras com 14 nm de filme de Ti nota-se que os níveis médios de absorção são muito semelhantes, em torno de 40%, e ainda pode-se afirmar que a absorção do filmes em substratos de fibra são mais constantes que a observada em filmes poliméricos contínuos.

Figura 32 – Comparação das curvas de absorção de filmes de 15 nm de Ti depositados sobre: A) Fibra de vidro posteriormente laminada com resina epóxi e; B) Polímero



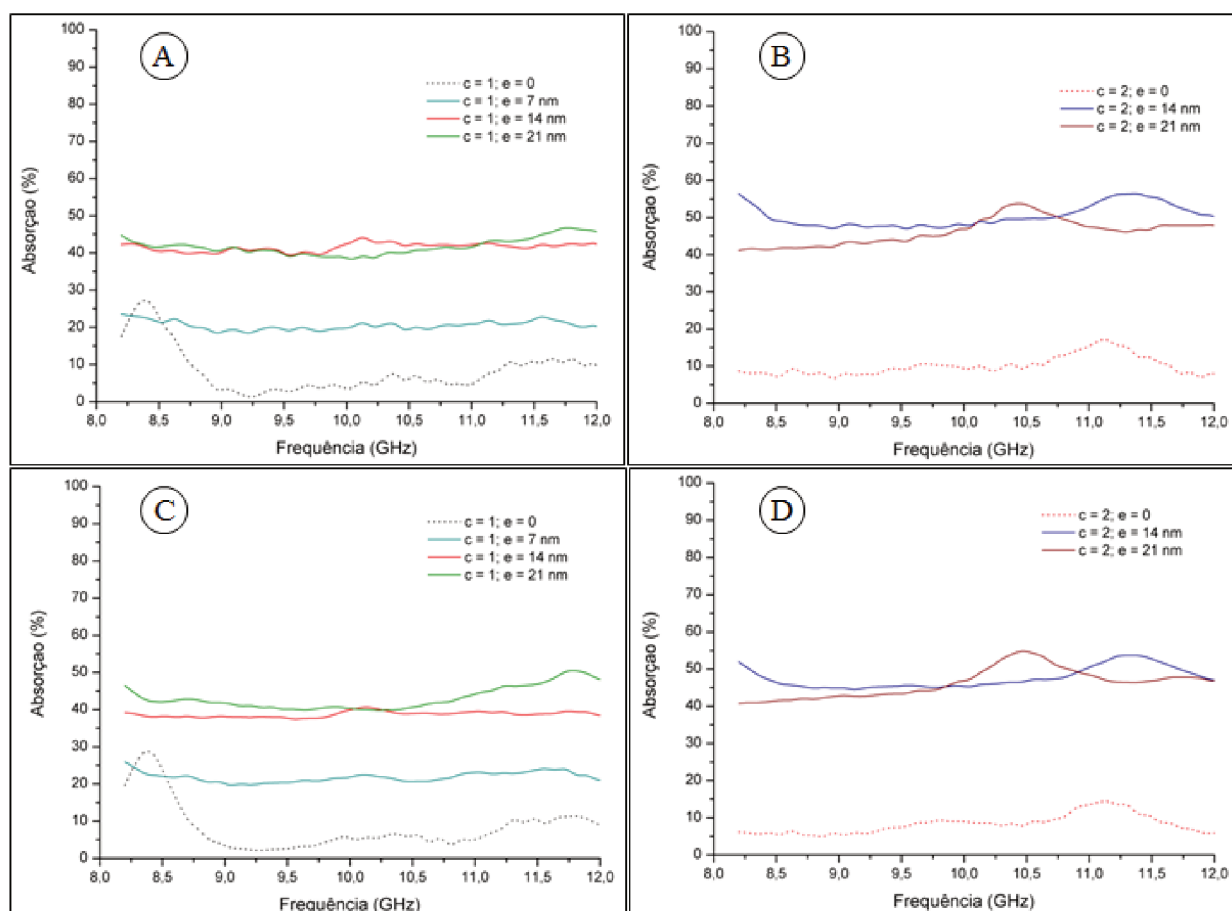
Fonte: Autor e adaptado de Soethe, 2009, p. 161.

#### 4.4.1. Avaliação da influência da espessura dos filmes e do número de camadas de fibra de vidro no índice de absorção eletromagnética dos compósitos

Com a finalidade de encontrar uma configuração ótima entre a espessura de filme de Ti e o número de camadas de fibra de vidro no compósito, foram elaborados gráficos comparando a absorção eletromagnética das amostras com o mesmo número de camadas de fibra de vidro e diferentes espessuras de filme de Ti.

A Figura 33 (A e B) apresenta os gráficos com as curvas de absorção da face frontal dos compósitos com uma e duas camadas de fibra de vidro respectivamente. Os gráficos C e D da Figura 33 correspondem às curvas de absorção do verso dos mesmos compósitos com uma e duas camadas de fibra de vidro, respectivamente.

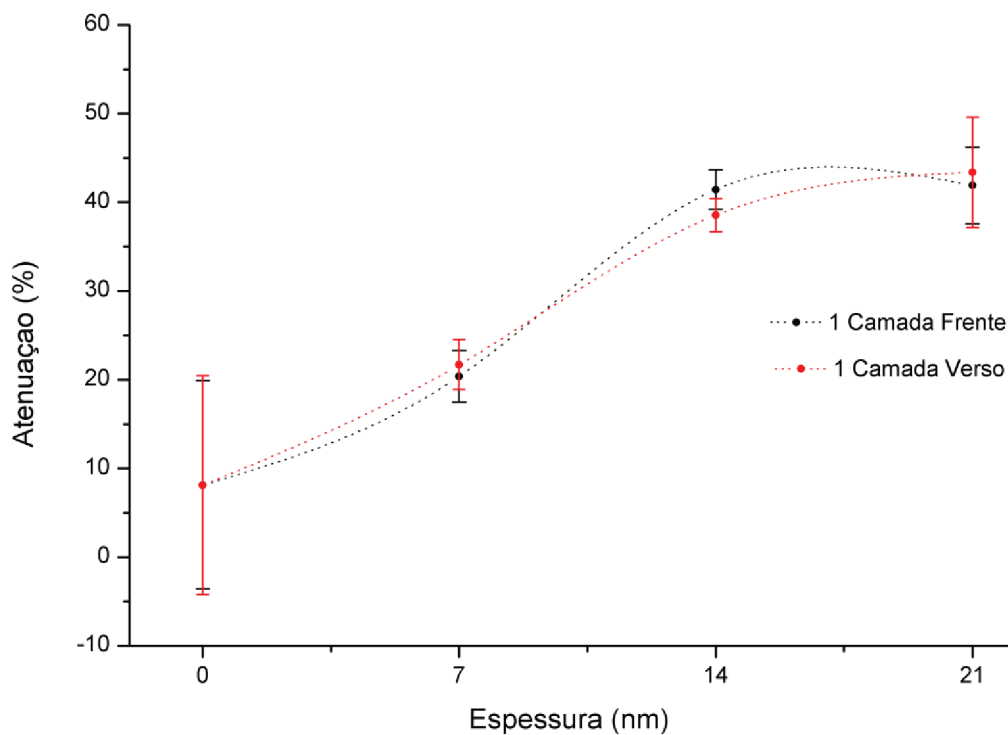
Figura 33 – Comparação da absorção de diferentes espessuras de filmes de Ti em compósitos com mesmo número de camadas de fibra de vidro. A) 1 camada, frente; B) 2 camadas, frente; C) 1 camada, verso; D) 2 camadas, verso.



Fonte: Autor

Analisando a Figura 32 (A e C), referentes a absorção na frente e no verso de compósitos de uma camada de fibra, é possível notar que a absorção média cresceu em função do aumento da espessura do filme, sendo que o compósito com filmes de 21 nm o material com melhor desempenho, com médias de absorção de 41,89% na face frontal e 43,37% no verso. No entanto, é interessante observar que a taxa de aumento da absorção em função do aumento da espessura é notavelmente maior quando essa é variada de zero até 14 nm, do que quando se varia de 14 nm até 21 nm. Isso indicaria uma possível alteração do comportamento da absorção em função de espessura, caracterizando a identificação de uma espessura ótima em torno de 21 nm. Tal comportamento é apresentado na forma de gráfico na Figura 34, evidenciado em forma de linha de tendência. Também foram adicionados ao gráfico barras de erro equivalentes a duas vezes o desvio padrão obtido no cálculo da absorção média para cada amostra.

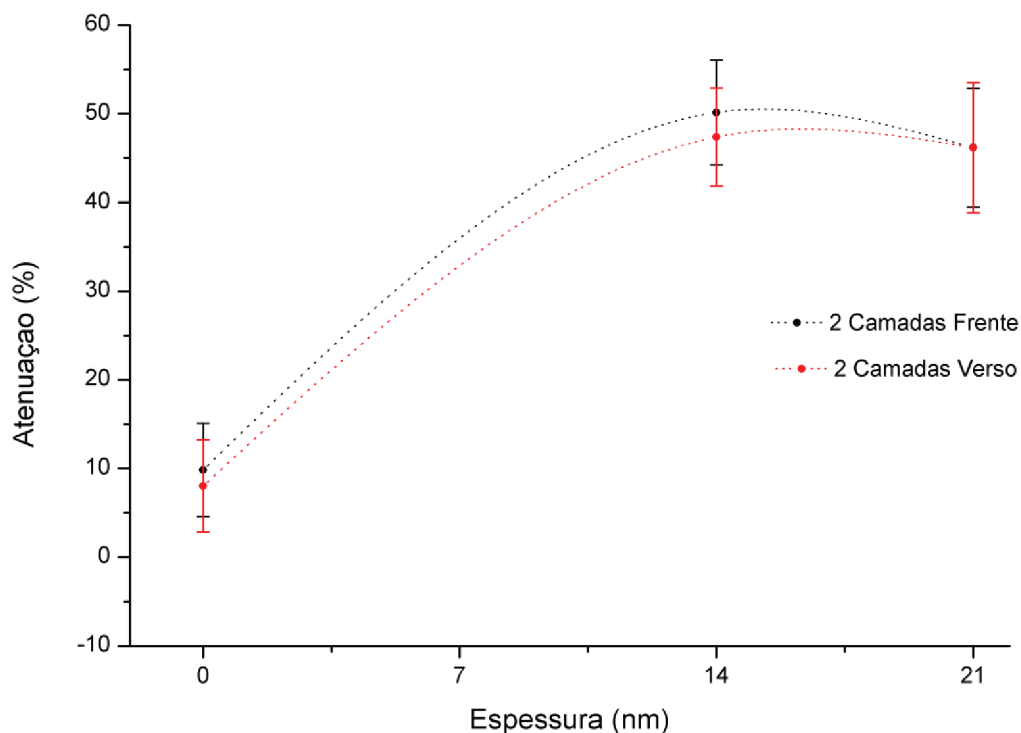
Figura 34 – Relação entre absorção média dos compósitos de uma camada e a espessura dos filmes de Ti



Fonte: Autor

A análise da Figura 32 (B e D), relativa aos compósitos formados por duas camadas de fibra de vidro, evidencia uma taxa média de absorção positiva em função do aumento da espessura dos filmes metálicos até a espessura de 14 nm. Em algum ponto no intervalo de espessuras de 0 a 21 nm existe um ponto de máximo que faz com que a absorção média dos compósitos que utilizam filmes de Ti com 21 nm de espessura seja mais baixa em relação aos que utilizam filmes de 14 nm. Esse comportamento pode ser observado na forma de gráfico na Figura 35, que também conta com uma linha de tendência e barras de erro, como na Figura 34.

Figura 35 – Relação entre absorção média dos compósitos de duas camadas e a espessura dos filmes de Ti



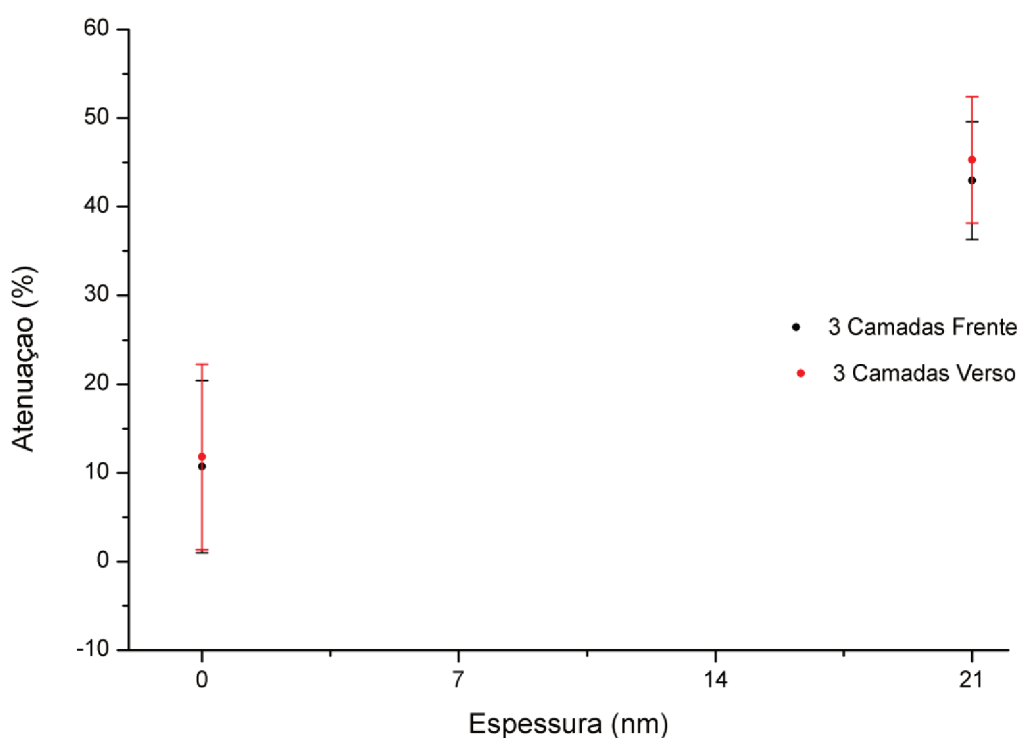
Fonte: Autor

A perda dos dados da absorção da amostra “ $c = 2$ ;  $e = 7$  nm” prejudica a identificação precisa do intervalo que contém o ponto de máxima absorção em função da espessura, no entanto é possível afirmar que os índices de absorção média dos compósitos com duas camadas foram ligeiramente mais altos que os obtidos nos compósitos com uma camada, para toda a faixa de espessuras testada, nas condições de frente e verso.

Os comportamentos observados nas análises contidas nessa seção indicam que a absorção em compósitos que utilizam mais de uma camada de fibras absorvedoras pode ser mais eficaz do que em compósitos com apenas uma camada. Isto se deve, possivelmente a soma de diferentes mecanismos de absorção. A utilização de filmes com espessuras próximas as 14 nm, sobrepostos e separados pela resina permite que a radiação incidente penetre no material por um melhor casamento de impedância entre o material e o ar, e posteriormente, pela existência de outra camada do mesmo elemento, com espessura

equivalente, a radiação transmitida pela primeira camada seja percebida pelo revestimento da segunda camada, amplificando o processo de absorção já iniciado na primeira face (SOETHE, 2009). No entanto, observando o comportamento de absorção do compósito constituído por três camadas de fibra de vidro com filmes metálicos, apresentado na Figura 36, nota-se que os índices de absorção se encontram em uma faixa intermediária, entre compósitos constituídos de uma e de duas camadas. Tal comportamento pode indicar que o número ótimo de camadas para os compósitos avaliados neste estudo é igual a dois, porém, nada se pode afirmar sobre essa tendência visto que as camadas de fibra de vidro utilizadas no compósito de três camadas receberam diferentes espessuras de filme de Ti, não permitindo a comparação com os compósitos de uma e duas camadas, que receberam camadas com deposições de Ti de mesma espessura.

Figura 36 – Relação entre absorção média dos compósitos de três camadas e a espessura dos filmes de Ti

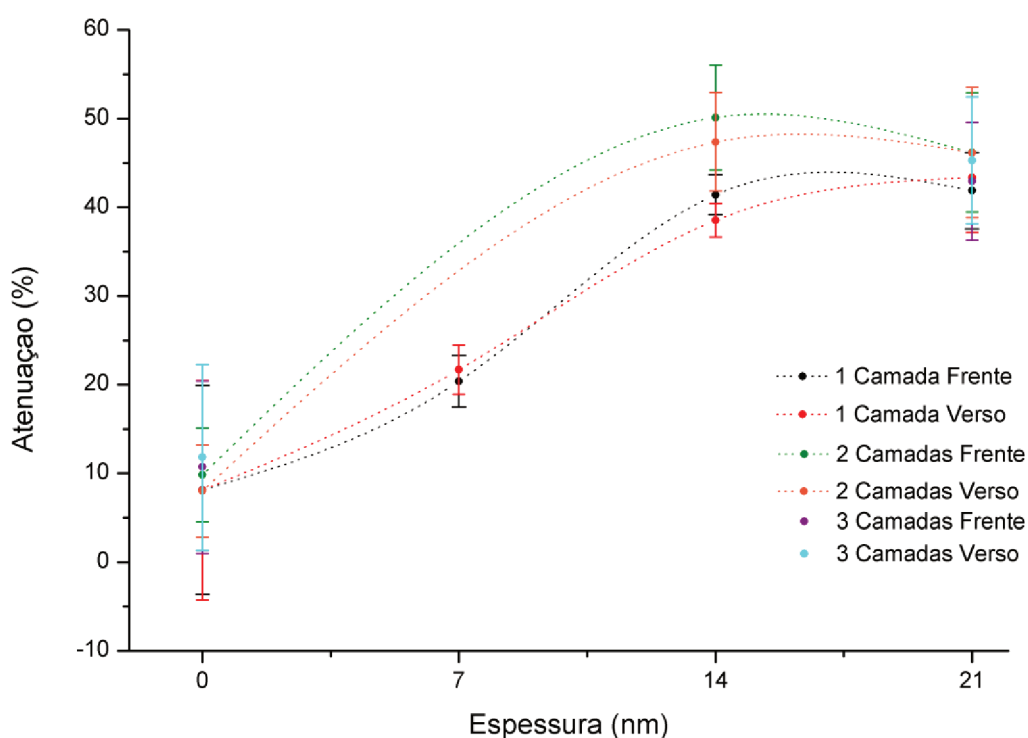


Fonte: Autor

O resultado da análise da relação da atenuação média com a espessura dos filmes de Ti para todas as configurações de número de camadas dos compósitos é apresentado na

forma de gráfico na Figura 37. A análise desse gráfico permite a constatação já comentada nessa seção, de que os compósitos de duas camadas promovem o melhor índice médio de absorção para a mesma espessura de filme, e que há um aparente ponto de máximo na relação absorção/espessura entre 14 e 21 nm.

Figura 37 – Comparativo entre as relações de absorção média e espessura de filmes dos compósitos com uma, duas e três camadas



Fonte: Autor

#### 4.4.2. Comparação da energia absorvida pela frente e pelo verso dos compósitos obtidos

Os resultados de absorção eletromagnética dos compósitos obtidos no presente trabalho identificaram diferenças entre os índices de absorção obtidos na face frontal e no verso dos mesmos. Buscando quantificar e entender esse comportamento, foi efetuado um estudo levantando as diferenças relativas entre a atenuação média obtida na face frontal e no verso das amostras, apresentado na Tabela 9.

A partir desses dados buscou-se encontrar na literatura alguma hipótese para explicar tal comportamento, mas não foram encontrados trabalhos que apresentassem situação semelhante, portanto foram levantadas algumas suposições que pudessem explicar as diferenças baseadas na análise dos resultados, considerando tendências e magnitudes dos valores obtidos.

Tabela 9 – Diferença relativa à absorção eletromagnética na face frontal e no verso dos compósitos obtidos.

Nome da Amostra	Posição	Atenuação Média (%)	Diferença (%Frente - %Verso)	Desvio Padrão (%)
c = 1; e = 0	Frente	8.14	0.04	5.88
	Verso	8.10		6.17
c = 2; e = 0	Frente	9.81	1.80	2.63
	Verso	8.01		2.61
c = 3; e = 0	Frente	10.71	-1.09	4.85
	Verso	11.80		5.23
c = 1; e = 7 nm	Frente	20.38	-1.32	1.30
	Verso	21.70		1.40
c = 1; e = 14 nm	Frente	41.42	2.88	1.12
	Verso	38.54		0.94
c = 1; e = 21 nm	Frente	41.89	-1.48	2.16
	Verso	43.37		3.11
c = 2; e = 14 nm	Frente	50.14	2.77	2.96
	Verso	47.37		2.76
c = 2; e = 21 nm	Frente	46.19	0.02	3.30
	Verso	46.17		3.67
c = 3; e = 7/14/21 nm	Frente	42.94	-2.36	3.33
	Verso	45.30		3.56

Fonte: Autor

Analisando os resultados expostos na Tabela 9 é possível perceber que não há uma relação clara de tais discrepâncias com nenhum dos parâmetros controlados no presente trabalho. Percebemos que a absorção na face frontal é maior que no verso em cinco das nove amostras, mas que esse comportamento aparentemente não está relacionado com a espessura de filmes utilizado nas camadas de fibra, pois podem ser observados comportamentos diferentes em amostras utilizando a mesma espessura de filmes, como nos



compósitos “ $c = 1; e = 21\text{nm}$ ” e “ $c = 2; e = 21\text{nm}$ ”. Nota-se também que não há relação do comportamento com o número de camadas utilizado nos compósitos, como se observa nas amostras “ $c = 1; e = 14\text{ nm}$ ” e “ $c = 1; e = 21\text{ nm}$ ”, que possuem o mesmo número de camadas porém, na primeira a absorção na face frontal é 7,47% maior que a absorção no verso e na segunda foi constatada uma média de absorção 3,41% menor na face frontal, em relação ao verso.

A amostra “ $c = 3; e = 7/14/21\text{ nm}$ ” foi confeccionada com a configuração de três camadas de fibra de vidro, sendo a primeira, da face para o verso, com 7 nm de Ti, a segunda com 14 nm e a terceira com 21 nm. Tal configuração foi escolhida justamente para possibilitar o entendimento da influencia da ordem dos absorvedores na absorção total de uma estrutura multi-camadas. O resultado obtido para essa amostra revela que a absorção pela face frontal foi 5.21% menor do que a absorção no verso. Ao comparar esse resultado com a diferença percentual do comportamento entre frente e verso das demais amostras, não é possível perceber qualquer diferença significativa que indique que a ordem dos absorvedores altere o comportamento de absorção total do compósito.

Baseado nos resultados, sugere-se que as diferenças entre a absorção na frente e no verso dos compósitos seja causada por parâmetros não controlados no presente trabalho, principalmente ligados a fabricação das amostras, como: rugosidade na frente e no verso da amostras; nível de cura da resina utilizada; aprisionamento de bolhas de ar no compósito durante a laminação, e; nível de impurezas nas superfícies das amostras. Outra hipótese a ser considerada para explicar essa variação, considerando que as variações em geral são menores que os respectivos desvios padrão calculados para as absorções médias, é a estatística experimental. Talvez, se fossem comparadas as médias de uma amostragem maior de resultados, os índices de absorção na frente e verso convergiriam. Entretanto, para a confirmação de qualquer uma das hipóteses aqui mencionadas, são necessários estudos mais aprofundados.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou avaliar a efetividade de um compósito de fibra de vidro com filmes finos de titânio quanto a capacidade absorver radiação emitida por radares sem a necessidade de revestimentos ou mudança de geometria, focado na aplicação em embarcações furtivas. Para isso, foram preparadas amostras de compósitos utilizando fibra de vidro revestida com filmes finos de titânio e resina epóxi, as quais foram testadas quanto sua absorção eletromagnética na faixa de frequências de 8 a 12 GHz, normalmente empregada por radares.

Foi utilizada a técnica de Triodo Magnetron Sputtering para depositar os filmes metálicos sobre as fibras de vidro, buscando a obtenção filmes com espessuras na ordem de 15 nm. De modo a possibilitar a identificação de relações da absorção eletromagnética com propriedades das amostras, o número de camadas de fibra nos compósitos e a espessura dos filmes finos foram variados sistematicamente. Foram também confeccionadas amostras de compósitos utilizando camadas de fibra de vidro sem deposição de Ti, cujos resultados de absorção eletromagnética foram utilizados como referência. Além da avaliação da absorção eletromagnética nos compósitos, as camadas de fibra com titânio foram analisadas quanto a suas propriedades elétricas e morfológicas, através de ensaios de resistividade e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

Foram preparados filmes com espessuras de 7, 14 e 21 nm, verificadas através de um ensaio de perfilometria. A análise de MEV evidenciou que o titânio foi depositado uniformemente sobre a superfície dos tecidos de fibra vidro, porém, devido a trama dos fios de vidro, verificou-se que a deposição se apresenta intermitente na direção do comprimento dos mesmos. Sugere-se que tal característica é responsável pelo comportamento observado no ensaio de resistividade elétrica, que constatou que a presença do filme metálico não alterou o comportamento isolante do tecido de fibra de vidro.

Os resultados de absorção eletromagnética das amostras que receberam as fibras com titânio apresentaram uma absorção constante em toda a faixa de frequência, com índices máximos de absorção média na ordem de 50% enquanto as amostras confeccionadas com fibra de vidro pura apresentaram índices de absorção na ordem de 10%. Tal comportamento confirma a efetividade dos filmes finos metálicos como absorvedores de micro-ondas, mesmo quando alocados na fase reforço de um compósito.

Ressalta-se que alguns dos índices de absorção observado nas amostras do presente trabalho superaram ligeiramente os índices alcançados no trabalho de Soethe (2009), que estudou a absorção de filmes de titânio sobre substratos poliméricos contínuos. Isso indica que estruturas multicamadas, e substratos irregulares podem contribuir para a efetividade de absorção de um material, como o previsto em Rejas (2014).

As curvas de absorção das amostras também indicaram comportamento típico de absorvedores de banda larga, tipo W, por apresentarem pouca variação na magnitude de absorção em toda a faixa de frequência testada. Esse comportamento é similar aqueles observados por Soethe (2009), sendo interessante para aplicações com finalidade furtiva.

Nos compósitos com uma camada de fibra foi observada uma tendência de aumento da absorção em função do aumento da espessura do filme, porém a taxa dessa relação é significativamente reduzida quando a espessura varia de 14 nm para 21 nm, indicando um possível ponto de máxima absorção em torno de 21 nm. Nos compósitos com duas camadas também foi observada uma tendência de aumento da absorção em função do aumento da espessura do filme, no entanto, nota-se que nesse caso o índice de absorção da amostra com filmes de 14 nm foi ligeiramente maior que o da amostra com filmes de 21 nm. Isso pode indicar uma espessura de máxima absorção em torno de 14 nm, para compósitos com duas camadas.

Em todos os casos, os compósitos com duas camadas apresentaram índices absorção ligeiramente melhores que os compósitos com uma camada e espessura de filme equivalente. Essa pequena alteração indica que deve haver um limite de absorção, independente do número de camadas, que demanda ainda de explicação, gerando novos estudos para sua elucidação e aplicação. Além disso, a observação de níveis elevados de absorção nos compósitos preparados propõe que esta interação da radiação não depende da continuidade elétrica do filme, tendo em vista que o material proposto se apresentou altamente descontínuo.

O equipamento utilizado para medir a absorção eletromagnética das amostras permitiu a análise da face frontal e do verso das mesmas. A partir disso, constatou-se que a absorção ocorre em magnitudes semelhantes, com pequenas discrepâncias, em ambos os lados das amostras, o que pode ser interessante visando a aplicação do material em embarcações furtivas, que além de absorverem o sinal de sistemas de detecção externos, poderiam também absorver o sinal de emissão de sistemas internos.

Não foram encontradas na literatura hipóteses que explicassem as discrepâncias observadas na magnitude de absorção entre frente e verso das amostras. As diferenças parecem não ter relação com a espessura dos filmes e com o número de camadas do compósito, sugerindo relação com parâmetros não controlados no presente trabalho, gerando flutuações estatísticas dos dados colhidos.

Julgando os resultados e análises efetuadas pelo presente trabalho, conclui-se que ao aplicar filmes finos de titânio na fase reforço de um compósito de resina epóxi reforçado com fibra de vidro, é possível a obtenção de um material absorvedor de radiação eletromagnética de banda larga na faixa de frequências de 8 a 12 GHz. Considerando a grande aplicação desse tipo de compósito na construção naval, o material se apresenta promissor para uso em embarcações furtivas, podendo absorver grande parte da radiação emitida por radares, dificultando ou impossibilitando a identificação da mesma.

### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados encontrados neste trabalho abrem caminhos para muitos estudos avançados, tanto em caráter aplicado quanto científico, de entendimento dos princípios fundamentais envolvidos na interação de radiação eletromagnética com filmes metálicos nanométricos. Para que haja um melhor entendimento sobre os fenômenos observados no presente trabalho, o potencial de aplicação e a efetividade do material quando aplicado em uma embarcação furtiva, é necessária a realização de estudos mais amplos, focando nos parâmetros que influenciam a absorção eletromagnética dos compósitos e nas propriedades necessárias para aplicação do material em uma embarcação. Baseado nisso, os tópicos listados a seguir são sugeridos para temas de trabalhos futuros:

- Estudo da redução do RCS de um modelo de embarcação construído com compósitos de fibra de vidro com deposição de filmes finos de Ti, em relação ao mesmo modelo construído em compósito de fibra de vidro pura;
- Utilização de diferentes tipos de resina, e técnicas de laminação de amostras de fibra de vidro com deposição de Ti, buscando entender a relação dos parâmetros de construção da amostra na magnitude de absorção eletromagnética da mesma;

- Obter e avaliar a absorção eletromagnética de compósitos de fibras de vidro com deposição de filmes de diferentes materiais metálicos tais como Alumínio, Cobre e ligas metálicas em geral;
- Criar uma base de dados de absorção eletromagnética de compósitos com diferentes números de camadas de fibra de vidro, e diferentes espessuras de filmes de Ti aplicados nessas camadas, a fim de evidenciar tendências e encontrar configurações ótimas;
- Estudar a relação entre a absorção e a continuidade elétrica dos filmes metálicos, envolvendo a deposição totalmente contínua nas fibras e deposições com descontinuidades controladas, como no caso deste trabalho;
- Analisar as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos no presente trabalho, e a viabilidade de sua aplicação em embarcações.

## REFERÊNCIAS

- BAGUDAI, P. P. **Quantum Stealth**. 2013. 23f. Trabalho de conclusão de curso de Bachelor of Technology in Electronics and Communication Engineering. Siksha 'o' Anusandhan University, Bhubaneswar, Odisha, India. 2013.
- BERGIN, A.; BATEMAN, S. Law and order at sea in the South Pacific: the contribution of the Pacif Patrol Boat Project. **Ocean & Coastal Management**. v. 42, p. 555-568. 1999.
- BLATTNER, M. et al. What color do you see? **Science Teacher**. V. 80, n. 3. p. 62-65. 2013
- CHAGAS, A. T. A. et al. Illegal hunting and fishing in Brazil: a study based on data provided by environmental military police. **Brazilian Journal of Nature Conservation**. V. 13, p. 183-189. 2015.
- CHALMERS, D. W. The potential for the use of composite materials in marine structures. **Marine Structures**. v. 7, p. 441-456. 1994.
- CHARRIS, V.; TORRES, J. M. Analysis of radar cross section assesment methods and parameters affecting it for surface ships. **Ship Science & Technology**. v. 6, n.11, p. 91-106. 2012.
- DELATORRE, R. G. **Medidas elétricas em filmes finos ultrafinos aplicados em materiais absorvedores de radiação eletromagnética**. Projeto de pesquisa científica em Física da Matéria Condensada e Nanotécologia. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2013.
- DIAS, J. C. **Obtenção de revestimentos absorvedores de radiação eletromagnética (2 - 18GHz) aplicados no setor aeronáutico**. 2000. Tese de doutorado em Física de Plasma. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.
- FOLGUERAS, L. C.; REZENDE, M. C. Processamento de material absorvedor de radiação eletromagnética a partir da impregnação de tecido de fibra de vidro com polímero condutor de polianilina. **Revista de Ciências Exatas**. V. 12, n. 2, p. 155-160. 2006.
- FOLGUERAS, L. C.; REZENDE, M. C. Microwave absorption of nanocomposite material as use with ras. **16th International Conference on Composite Structures**. FEUP, Porto, 2011.
- FONTANA. L. C.; MUZART J. L. R. Characteristics of triode magnetron sputtering: the morfology of deposited titanium films. **Surface and Coatings Technology**. v. 107, p. 24-30. 1998.
- FREIRE Jr., R. C. S. **Estudo da prevenção de falha por fadiga em laminados de plástico reforçado com fibra de vidro**. 2001. Dissertação (Mestrado). 155 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2001.

GREENE, J. E. et al. Microstructural evolution during film growth. **Journal of vacuum science and technology A**. v. 21, n. 5, p. 117-128. 2003.

HERAKOVICH, C. T. Mechanics of composites: A historical review. **Mechanics Research Communications**. V. 41, p. 1-20. 2012.

HOGUE, J. ; CORBETT, L. Epoxy resin infused boat hulls. **Reinforced Plastics**. v. 00, n. 00. Fevereiro, 2016.

HYDE IV, M. W.; BOGLE, A. E.; HAVRILLA, M. J. Nondestructive characterization of Salisbury screen and Jaumann absorbers using a clamped rectangular waveguide geometry. **Measurement**. V. 53, p. 83-90. 2014

JOB, S. Why not composites in ships? **Reinforced Plastics**. v. 59, n. 2, p. 90-93. 2015

KIMPARA, I. Use of advanced composite materials in marine vehicles. **Marine Structures**. v. 4, p. 117-127. 1991.

LAVERS, C. **Reeds Marine Engineering and Technology: Stealth Warship Technology**. London, UK: Bloomsbury, 2012. 175 p.

LEE, S. M. **International Encyclopedia of Composites**. New York: VHC Publishers, p. 404-430, v.6, 1991.

LEWIS, J. S. Maritime piracy confrontations across the globe: Can crew action shape the outcomes? **Marine Policy**. V. 64, p. 116-122. 2016.

MARSH, G. Composite boost patrol craft performance. **Reinforced Plastics**. v. 34. 2006.

MARTÍN, A. P.; TISMER, S.; HOCHÉ, T. Structural characterization of laser bonded sapphire wafers using a titanium absorber thin film. **Journal of Materials Science & Technology**. v. 31, p. 484-488. 2015.

MILEWSKI, S. et al. Coatings masking in near, medium and far - infrared used for ship camouflage. **Proceedings of SPIE**. V. 8185. p. 1-10. 2011.

MOURA, D. V. Uma análise da soberania na plataforma continental brasileira. **Ambito Jurídico**, Rio Grande, XII, n. 63, abr 2009.

MOURITZ, A. P. et al. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. **Composite Structures**. v. 53, p. 21-41. 2001.

NOHARA, E. L. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnéticos**. 2003. 220 f. Tese de doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

QUADROS, H. B. **Avaliação das características resistivas de filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética**. 2014. 84 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Aeroespacial. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

RECCO, A. A. C.; MUZART, J. R. L.; FONTANA, L. C. Deposição de filmes de TiN por triodo magnetron sputtering. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Natal/RN, 2002.

REJAS, P. E. B. **Filmes finos metálicos absorvedores de radiação eletromagnética aplicados a tecnologia furtiva**. 2014. 53 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Aeroespacial. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

ROGALSKI, A.; CHRZANOWSKI, K. Infrared devices and techniques (revision). **Metrology and Measurement Systems**. V. 21, n. 4, p. 565-618. 2014.

RUSSEL, C. Composites: long-term viability and benefits. **Reinforced Plastics**. v. 49, n. 9, p. 36-42. 2005.

SAGÁS, J. C. et al. Deposição de filmes de CNx por triodo magnetron sputtering. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**. V. 26, n. 4, p. 211-216. 2007

SALMON, L.G., 1993, Evaluation of thin film MCM materials for high-speed applications, **IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology**, Vol. 16, No. 4, p. 388-391.

SANTOS, F. M.; TEMAREL, P.; SOARES, C. Modal analysis of a fast patrol boat made of composite material. **Ocean Engineering**. v. 36, p. 179-192. 2009.

SAVILLE, P. Review of Radar Absorbing Materials. **Defense Research and Development Canada**. v. 3 . 2005.

SESHAN, K. **Handbook of Thin Film Deposition: Processes and Technologies**. Norwich, New York, U.S.A: William Andrew Publishing, 2002. 609 p.

SIMÕES, R. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8 a 12 Ghz**. 2005. Dissertação (Mestrado) Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, Taubaté, 2005.

SINGHA, M.; SINGHA, K. Applications of textiles in marine products. **Marine Science**. V. 2, n. 6, p. 110-119. 2012.

SOETHE, V. L. et al. Influência da espessura de filmes finos de alumínio na atenuação da energia da onda eletromagnética na faixa de microondas (8 – 12GHz). **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**. v. 27, n. 2, p. 63-67. 2008.

SOETHE, V. L. et al. Radar absorbing material based on titanium thin film obtained by sputtering technique. **Journal of Aerospace Technology Management**. v. 3, n. 3, p. 279-286. 2011.

SOETHE, V. L. **Filmes finos absorvedores de micro-ondas obtidos pelo processo de deposição física em fase vapor**. 2009. 305f. Tese de doutorado em Física de Plasma. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.



TATSCH, P. J., Deposição de Filmes Finos. **V Oficina de Microeletrônica**. Campinas, SP. p.22, 2000.

TATSCH, P. J.; DAMIANI, F. Medidas de caracterização para microeletrônica: perfilometria. Disponível em <<http://www.dsif.fee.unicamp.br/~furio/IE607A/Perfilom.pdf>> Acesso em maio/2016

TROSCIANKO, T. et al. Camouflage and visual perception. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**. V. 364, p. 449-461. 2009.

TUPPER, E. C. Ship Types. In: TUPPER, Eric C.. **Introduction to Naval Architecture: formerly Muckle's Naval Architecture for Marine Engineers**. 4. ed. Jersey City, New Jersey, U.s.a.: Butterworth Heinemann, 2004. Cap. 17. p. 335-373.

THOMPSON, J.; VAITEKUNAS, D.; BROOKING, B. Lowering warship signatures: electromagnetic and infrared. **Signature Management - The Pursuit of Stealth**. W.R. Davis Engineering Limited. Ottawa, Ontario, Canada. 2000. 10 p.

VASCONCELLOS, J. M.; LATORRE, R. Development of BOATDSS high speed boat design database. **Ocean Engineering**. v. 26, p. 891-904. 1999.

VAUGHAN, D. J. Fiberglass reinforcement. In: PETERS, S. T.. **Handbook of Composites**. 2 ed. Tonbridge, England.: Chapman & Hall, 1998. Cap. 7. p. 131-155.

VENTURA, A. M. F. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**. V. 21, n. 3/4, p. 10-19. 2009.

VOLLMER, M.; MOLLMANN, K. P. **Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications**. New Jersey, U.S.A.: John Wiley & Sons, 2010. 593 p

YI, M.; WANG, L.; HUANG, J. Active cancellation analysis based on the radar detection probability. **Aerospace Science and Technology**. v. 46, p. 273-281. 2015.