

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

VINÍCIUS MARTINS FREIRE

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL POLIMÉRICO DE MATRIZ ALQUÍDICA COM
CARACTERÍSTICAS ABSORVEDORAS DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Joinville

2017

VINÍCIUS MARTINS FREIRE

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL POLIMÉRICO DE MATRIZ ALQUÍDICA COM
CARACTERÍSTICAS ABSORVEDORAS DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Viviane Lilian Soethe

Joinville

2017

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

Freire, Vinícius Martins

Desenvolvimento de material polimérico de matriz
alquídica com características absorvedoras de radiação
eletromagnética / Vinícius Martins Freire ; orientadora,
Viviane Lilian Soethe , 2017.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Aeroespacial, Joinville, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Aeroespacial. 2. Material Absorvedor de
Radiação Eletromagnética. 3. Matriz alquídica. 4. Dióxido de
Titânio. 5. Óxido Férrico. I. , Viviane Lilian Soethe. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Aeroespacial. III. Título.

VINÍCIUS MARTINS FREIRE

**DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL POLIMÉRICO DE MATRIZ
ALQUÍDICA COM CARACTERÍSTICAS ABSORVEDORAS DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA**

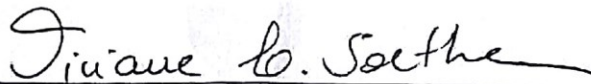
Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Aeroespacial na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Joinville (SC), 04 de Dezembro de 2017.

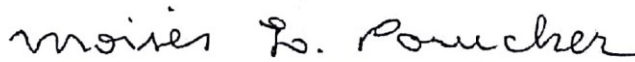


Prof. Dra. Talita Sauter Possamai
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

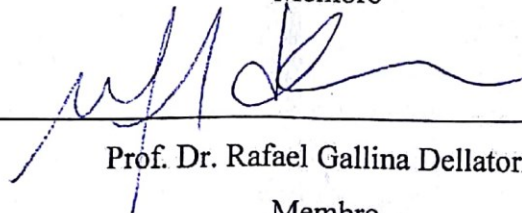


Prof. Dra. Viviane Lilian Soethe
Orientadora/Presidente



Prof. Dr. Moisés Luiz Parucker

Membro



Prof. Dr. Rafael Gallina Dellatorre
Membro

Este trabalho é dedicado aos meus pais, colegas e família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela companhia, inspiração nos momentos difíceis e por ter me permitido viver o sonho de estar fazendo esse curso e tudo que a universidade me propiciou.

Aos meus familiares, especialmente aos meus pais, João e Rogéria, e à minha irmã, Letícia, os quais são pessoas indispensáveis na minha jornada. Vocês me ensinaram os mais importantes valores da vida e também são responsáveis por essa conquista!

À minha namorada, Fernanda, cuja cumplicidade fora essencial nessa jornada de escrever o TCC. E por não permitir que eu desanimasse diante das intempéries da vida.

À minha orientadora e amiga Viviane. Que abraça o mundo com tamanha dedicação e esforço, algo deveras superior ao que sua função exige e obrigado por acreditar e confiar em mim. Levo em minha jornada todos seus ensinamentos durante esses longos anos.

Aos meus amigos de longa data, pela parceria ao longo dos últimos anos, especialmente ao Lucas, por entender que com o TCC, os trabalhos do semestre tiveram seus prazos cada vez mais encurtados! Os momentos de descontração foram tão importantes quanto as noites de estudos. Ressalto, também, o agradecimento aos amigos da turma 2013/1 e do PET, o qual fiz parte.

Aos meus amigos, que formaram o melhor time da mobilidade, mas que agora formam o melhor time de engenheiros que esse campus jamais viu, sucesso a todos e bora SEDENTÁRIOS!

Finalmente, à UFSC. Sou grato pelo esforço dedicado ao longo desses cinco anos, por parte dos diretores, professores e servidores. Sem vocês, esse sonho ainda estaria no papel.

"Decidi há muito tempo não caminhar à sombra de alguém. Se eu fracassar ou obtiver sucesso, terei vivido acreditando em mim".

(Whitney Houston)

"Para se ter sucesso, é necessário amar de verdade o que se faz. Caso contrário, levando em conta apenas o lado racional, você simplesmente desiste. É o que acontece com a maioria das pessoas."

(Steve Jobs)

RESUMO

Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) são compostos que absorvem a radiação eletromagnética incidente, dissipando-as sob a forma de calor, efeito explicado pelo efeito Joule. O conhecimento tecnológico obtido pela pesquisa desse material, que é obtido pela combinação de componentes, como: substrato, matrizes poliméricas e aditivos com adequadas propriedades dielétricas e magnéticas, são características fundamentais para o desempenho do material absorvedor. Este trabalho aborda a preparação e avaliação das características absorvedoras de compósitos híbridos de matriz alquídica aditivados com óxido férrico e dióxido de titânio, pela metodologia da agitação mecânica. Os resultados indicam que a característica da absorção é dependente do teor e tipo de aditivos utilizado na mistura. Atenuações da radiação eletromagnética na faixa de frequência de micro-ondas (8-12GHz) de até 44,3% foram obtidos. Os resultados indicam que o material em estudo é promissor para utilização em aplicações onde seja necessário reduzir a visibilidade ao radar.

Palavras-chave: Dióxido de Titânio. Óxido Férrico. Matriz alquídica. Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética.

ABSTRACT

Radiation-Absorbent Materials (RAM) are compounds that absorb incident electromagnetic radiation, dissipating them in the form of heat, an effect explained by the Joule's effect. The technological knowledge obtained by the research of this material, which is obtained by the combination of components, such as: substrate, polymer matrices and additives with adequate dielectric and magnetic properties, are fundamental characteristics for the performance of the absorber material. This work deals with the preparation and evaluation of the absorber characteristics of hybrid composites of alkyd matrix added with ferric oxide and titanium dioxide by mechanical mixing method. The results indicate that the absorption characteristic is dependent on the content and type of additives used in the blend. Attenuations of the electromagnetic radiation in the range of microwave frequencies (8-12GHz) of up to 44.3% were obtained. The results indicate that the study material is promising for use in applications where radar visibility needs to be reduced.

Keywords: Titanium Dioxide. Ferric Oxide. Alkyd Matrix. Radiation-Absorbent Materials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração de um marcapasso cardíaco wireless sofrendo problemas de EMI quando atingido por ondas eletromagnéticas.	17
Figura 2 – Imagem ilustrativa de uma aeronave militar americana - F117A.....	19
Figura 3 – Ilustração da estrutura de Salisbury em material espesso, o qual é composto de uma película resistiva e MARE com comprimento de 25% da onda incidente.	20
Figura 4 – Imagem ilustrativa de uma câmara anecóica utilizada em testes de interferência eletromagnética.....	21
Figura 5 – Curvas características de absorção para absorvedores do tipo N (1) e W (2).....	23
Figura 6 – Ilustração de materiais absorvedores adesivos do tipo magnéticos de diversos tamanhos, para aplicações de blindagens de componentes eletrônicos.	27
Figura 7 – Materias absorvedores do tipo dielétrico de tamanho próximo a uma bola de golfe, sendo polímeros e espumas para antenas, guias de onda e telecomunicações.	28
Figura 8 – Representação esquemática da estrutura química de formação de um composto alquídico.	32
Figura 9 – Demonstração esquemática das células unitárias das fases a) rutilo, b) brookita e c) anatase do dióxido de titânio.	35
Figura 10 – Imagem ilustrativa do pó de dióxido de titânio utilizado no trabalho.....	36
Figura 11 – Imagem ilustrativa do pó de óxido férrico utilizado no trabalho.	37
Figura 12 – Fluxograma geral das principais etapas do presente trabalho.....	38
Figura 13 – Imagem ilustrativa de um agitador magnético de temperatura constante.	40
Figura 14 – Imagem ilustrativa das amostras preparadas para a caracterização de guia de onda.	40
Figura 15 – Imagem ilustrativa do Microscópio eletrônico de varredura, da marca LEO e modelo 435 VPi.	41
Figura 16 – Laboratório de Difração e Fluorescência de Raios X do IAE/DCTA.....	43
Figura 17 – Esquema geral do princípio da conservação da energia eletromagnética incidente sobre um determinado material, para cálculo da energia absorvida pelo mesmo.	44
Figura 18 – Imagem ilustrativa do equipamento de guia de onda utilizado para caracterização da absorção de radiação eletromagnética entre 8,2–12,4 GHz.....	45
Figura 19 – Figura ilustrativa da comparação dos picos do óxido férrico analisado, com a hematita encontrada na base de dados do programa.....	47
Figura 20 – Figura ilustrativa da comparação dos picos do dióxido de titânio analisado, com a anatase encontrada na base de dados do programa.....	47
Figura 21 – Microscopia eletrônica de varredura da amostra com 1,25g de TiO ₂ e 1,25g de Fe ₂ O ₃ , com aumento de 50x, evidenciando a distribuição dos aditivos.....	48
Figura 22 – Microscopia eletrônica de varredura: A) Amostra 11, com 0,50g de TiO ₂ e 2,00g de Fe ₂ O ₃ e com aumento de 50x. B) Amostra 2, com 1,25g de TiO ₂ e 0,50g de Fe ₂ O ₃ e com aumento de 1000x. C) Amostra 3, com 0,50g de TiO ₂ e 0,50g de Fe ₂ O ₃ e com aumento de 1000x. D) Amostra 4, com 0,00g de TiO ₂ e 1,25g de Fe ₂ O ₃ e com aumento de 1000x.	49
Figura 23 – Distribuição da permissividade elétrica complexa das amostras de compósito, A – Parte real (ϵ') e B – Parte imaginária (ϵ'').....	51
Figura 24 – Distribuição da permeabilidade magnética complexa das amostras de compósito, A – Parte real (μ') e B – Parte imaginária (μ'').....	53

Figura 25 – Fotografia do plano lateral da Amostra 11, evidenciando a heterogeneidade da composição.	54
Figura 26 – Distribuição de impedância médias das amostras, em ohms [Ω].....	55
Figura 27 – Gráfico da distribuição das tangentes de perdas: A) Tangente de perda elétrica das amostras. B) Tangente de perda magnética das amostras.	56
Figura 28 – Corte lateral realizado na Amostra 1, que possuía 2,0 g de dióxido de titânio e ..	57
Figura 29 – Distribuição da atenuação de energia nos compósitos, em relação a frequência de onda incidente.....	58
Figura 30 – Distribuição da atenuação de energia média nos compósitos, de acordo com a massa de aditivos presente.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo de frequências eletromagnéticas utilizadas por sistemas de identificação.	18
Tabela 2 - Relação entre a atenuação do sinal refletido e porcentagem de energia absorvida.	23
Tabela 3 – Propriedades comparativas dos reforços em fibras de aramida, carbono e vidro...	29
Tabela 4 - Características de síntese da resina alquídica.	33
Tabela 5 - Modificações na resina alquídica para aprimoramento de aplicação.	34
Tabela 6 – Proporções em massa dos aditivos presentes nas amostras dos compósitos produzidos neste trabalho.	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. OBJETIVOS.....	14
1.1.1. Objetivo Geral.....	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. MARE: PRINCIPAIS ABORDAGENS	16
2.1.1. Aplicação Civil.....	17
2.1.2. Aplicação Militar (Tecnologia Furtiva)	18
2.2. TIPOS DE ABSORVEDORES	19
2.2.1. Cancelamento de fase da onda incidente	20
2.2.2. Espalhamento da onda eletromagnética	21
2.2.3. Utilização de materiais com perdas elétricas e magnéticas	22
2.3. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS MARES	24
2.4. ABSORVEDORES MAGNÉTICOS	25
2.5. ABSORVEDORES DIELÉTRICOS	27
2.6. MATERIAIS COMPÓSITOS	29
3. METODOLOGIA.....	31
3.1. MATERIAIS	31
3.1.1. Resina alquídica	31
3.1.2. Dióxido de Titânio (Anatase)	35
3.1.3. Óxido Férrico.....	36
3.2. MÉTODOS.....	38
3.2.1. Síntese do Compósito	39
3.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura	41
3.2.3. Difração de Raios-X	42
3.2.4. Caracterização por Guia de Onda.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA CRISTALINA DOS ADITIVOS.....	46
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO COMPÓSITO	48
4.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS DAS AMOSTRAS	50

4.4. AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NAS AMOSTRAS	58
5. CONCLUSÕES.....	61
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

Segundo Dias (2000) e Nohara (2003), Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) são aqueles que possuem, em sua composição, compostos que proporcionam perdas de energia da radiação eletromagnética em faixas de frequências estabelecidas. Esses materiais atenuam a radiação da onda incidente e transformam a energia absorvida em calor por meio de mecanismos internos, podendo ser do tipo magnético e/ou dielétrico. Estes mecanismos de perdas podem ser de naturezas física, química ou ambas.

A tecnologia furtiva, chamada popularmente de *Stealth*, desenvolve diversas técnicas de ocultação para tornar, normalmente, aviões e navios menos visíveis ao radar, sonar, câmera de captação de infravermelho ou ao visual (BAGUDAI, 2013).

O controle de interferência eletromagnética e a blindagem eletromagnética de alta frequência são muito utilizados, principalmente na área de telecomunicações – telefonia celular, sistemas de comunicação de navios, aeronaves e automóveis (NOHARA, 2003).

Já no setor militar, utiliza-se o material como revestimento para atenuar a energia espalhada por um alvo (eco-radar), sendo esta energia empregada para detecção de objetos por meio de radares. Assim, com o auxílio do material, o alvo torna-se mais difícil de ser detectado ou, como mencionado na literatura, invisível ao radar (FREIRE et al., 2017).

Devido à tecnologia *Stealth* ser considerada estratégica é restrita aos países que a desenvolvem. Simões (2005) afirma que a utilização de tal material, no ramo aeronáutico ou naval no Brasil, está atrelada ao desenvolvimento das tecnologias nacionais, razão que motiva o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

No Brasil, o Ministério da Ciência e Tecnologia e o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) estabeleceram prioridades tecnológicas de modo a definir um plano de desenvolvimento para o país entre os anos de 2010 e 2022. Um dos itens destacados neste documento refere-se à utilização de materiais avançados aplicados à blindagem eletromagnética (BRASIL, 2010).

Diversos trabalhos nacionais na área de materiais absorvedores de radiação eletromagnética foram publicados, dentre os quais pode-se citar: Nohara (2003), Simões (2005), Soethe et al (2008), Soethe (2009), Rezende et al (2000), Rejas (2014), Quadros (2014) e Simas (2016). Esses trabalhos tem enfoque no desenvolvimento de novos materiais absorvedores de radiação eletromagnética com aplicações na esfera civil e militar.

Considerando a importância do domínio tecnológico dos processos de absorção apresentados por MARE, no presente trabalho realizou-se a obtenção de um compósito polimérico de matriz alquídica aditivada com óxido férrico e dióxido de titânio, em fase anatase. Esses aditivos são combinados visando alterar as características absorvedoras do compósito. Kostikov (1995) afirma que os compósitos poliméricos têm atraído atenção de inúmeros grupos de pesquisa, tanto pela importância científica em se entender os novos fenômenos desses materiais mistos, quanto pelo potencial em aplicações tecnológicas. Este potencial é percebido na obtenção desse material, pois devido a facilidade de incorporação dos aditivos na matriz por meio, por exemplo, de agitação mecânica, verifica-se que o processo apresenta grande viabilidade industrial.

O desenvolvimento de um compósito, frequentemente empregado no setor aeronáutico e aeroespacial, com capacidade absorvedora de radiação eletromagnética, na faixa micro-ondas (8-12 GHz), justifica, portanto, o estudo realizado no presente trabalho.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. **Objetivo Geral**

Verificar a potencialidade absorvedora de radiação eletromagnética na faixa de frequência de micro-ondas de um compósito polimérico de matriz alquídica incorporado com dióxido de titânio e óxido férrico.

1.1.2. **Objetivos Específicos**

- Obter compósitos poliméricos alquídicos com diferentes teores de dióxido de titânio e óxido férrico;
- Caracterizar os compósitos quanto as suas propriedades eletromagnéticas;

- Caracterizar os compósitos morfológicamente;
- Comparar os níveis de absorção atingidos com a proporção de aditivos no compósito polimérico alquídico;
- Identificar o principal mecanismo de absorção de acordo com a proporção do aditivo, magnético ou dielétrico;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

2.1. MARE: PRINCIPAIS ABORDAGENS

O processo característico que se evidencia nos materiais absorvedores de radiação eletromagnética é o da excitação molecular devido à radiação eletromagnética incidente. Esta radiação tem sua absorção inerente às interações entre os campos magnéticos e elétricos que definem a natureza dos mecanismos de perda. Assim, MAREs são caracterizados em função de centros de absorvedores de radiação, definidos a partir de perdas magnéticas, elétricas ou de suas associações (DIAS et al., 2000).

A absorção de um sinal emitido por uma fonte determina sua eficiência, que é avaliada pela atenuação da reflexão da radiação pelo objeto em questão. Essa medida, denominada Seção Reta Radar (RCS), leva em conta tanto a geometria, quanto o material e é utilizada para descrever o tamanho virtual do objeto detectado pelo receptor de sinal em determinada frequência de análise (HALLIDAY & RESNICK, 1984).

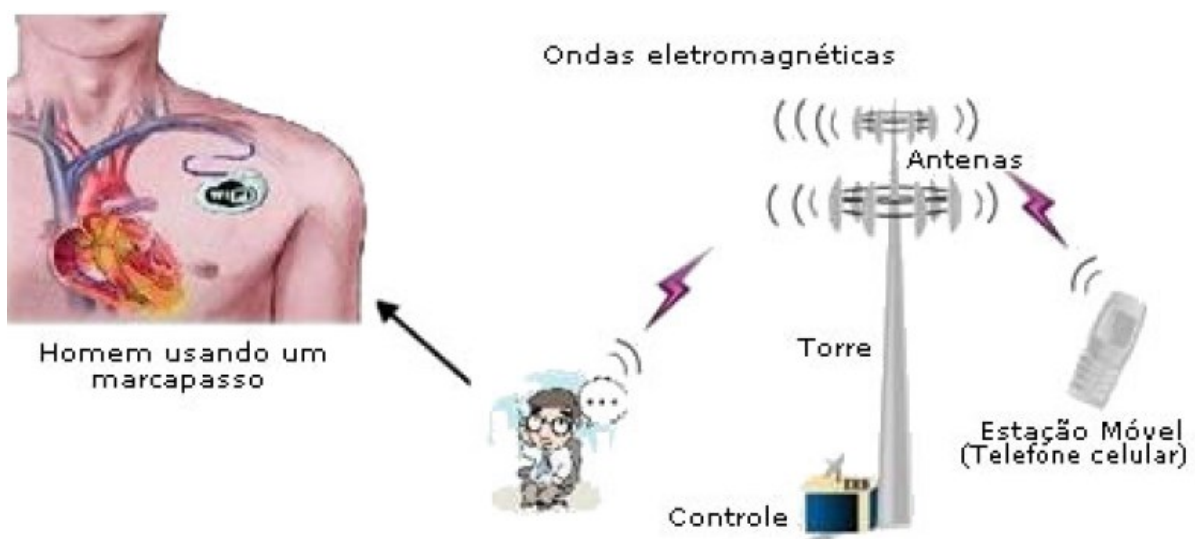
Esses materiais que podem atenuar a radiação refletida ou absorver grande parte dela são divididos em duas categorias (dielétricos e magnéticos). A primeira diz respeito aos materiais que apresentam aditivos dielétricos, constituídos de pequenas partículas como carbono sob a forma de grafite, metal, BaTiO₃ ou TiO₂. Por outro lado, a segunda categoria recai naquelas com aditivos magnéticos, que apresentam características magnéticas, sendo os mais usuais as ferritas, γ -Fe₂O₃, Fe₃O₄ ou BaFe₁₂O₁₉ (DIAS et al, 2000; SAINI & ARORA, 2012).

2.1.1. Aplicação Civil

Os MAREs possuem ampla utilização em aplicações civis, principalmente para redução de problemas de incompatibilidade e interferência eletromagnéticas. Assim, percebe-se que qualquer eletrônico, quando incidido por radiação eletromagnética, que venha a apresentar comportamento anômalo, tem a utilização de MARE justificada para não comprometer sua operação (MARINHO, 2010).

Segundo Dias et al. (2000), a aplicação deste tipo de material é bem difundida na área de telecomunicações, indústria de eletroeletrônicos e na área médica, quando aplicados na blindagem eletromagnética de instrumentos. Aplicações essas, onde a interferência eletromagnética, dita EMI (*Electromagnetic interference*), é o principal causador de mau funcionamento do sistema, exemplo que pode ser visto na Figura 1, onde é apresentado o problema de EMI na área médica com a utilização de marcapassos cardíacos. Estes equipamentos que recebem informações do meio externo podem ter seus sinais misturados com sinais de celulares ou outros sinais emitidos por antenas, tendo sua eficiência comprometida.

Figura 1 – Ilustração de um marcapasso cardíaco wireless sofrendo problemas de EMI quando atingido por ondas eletromagnéticas.



Fonte: MARINHO, 2010.

2.1.2. Aplicação Militar (Tecnologia Furtiva)

Saville (2005) afirma que, os materiais absorvedores antecederam a Segunda Guerra Mundial, e tiveram sua produção motivada pela invenção do radar, em 1930. Na 2ª Guerra Mundial fora contabilizada sua produção já em escala laboratorial, sendo que seu desenvolvimento se dá até os dias atuais.

Segundo Nohara (2003), para aplicações militares, a faixa de frequência de interesse é de 8–12 GHz, conhecida como Banda X. Na Tabela 1 é apresentado, de forma simplificada, um quadro que caracteriza e evidencia onde cada uma das faixas de frequência opera.

Tabela 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 _u	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 _a	27.000 – 40.000	Mapeamento de altíssima resolução, sistemas de vigilância de aeroportos
Milimétrica	40.000 – 300.000	Experimental

Fonte: NOHARA et al, 2009, p. 259.

De forma geral, os MAREs são aplicados de modo a promover a redução da assinatura radar (RCS), sendo esta uma medida do quão detectável um objeto é pelo radar. Quanto maior o valor de RCS, mais detectável é o objeto, portanto, uma aeronave furtiva, ou *stealth*, é aquela que possui baixo valor de RCS (REJAS, 2014). A Figura 2 apresenta um exemplo de uma aeronave que faz uso de tecnologia *stealth*. A tecnologia utilizada nesta aeronave vem tanto de materiais absorvedores que compõe sua estrutura externa, como de sua geometria, que tem a capacidade de dispersar a radiação eletromagnética incidente.

Figura 2 – Imagem ilustrativa de uma aeronave militar americana - F117A



Fonte: REJAS, 2014.

2.2. TIPOS DE ABSORVEDORES

Os tipos de absorvedores são definidos quanto ao mecanismo de atenuação:

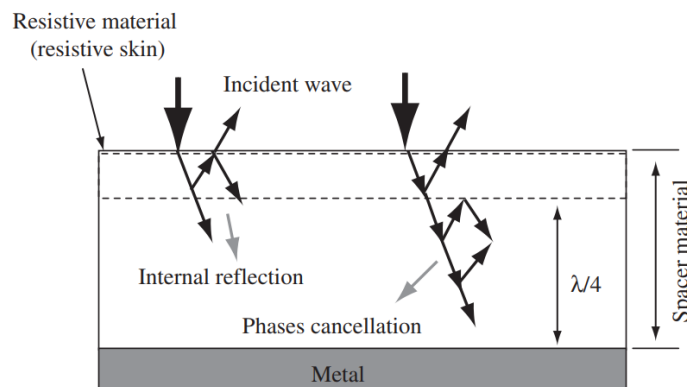
A obtenção da atenuação da onda eletromagnética é baseada nas seguintes técnicas: cancelamento de fase da onda incidente, espalhamento da onda em várias direções e utilização de materiais com perdas eletromagnéticas inerentes à faixa de frequência de interesse (MARINHO, 2010, p. 9).

2.2.1. Cancelamento de fase da onda incidente

Conforme explicitam Cohn, Daly e Parker (1995), essa técnica baseia-se, por intermédio do ajuste de espessura da amostra, no cancelamento de fases da onda eletromagnética. Tal efeito é dado pela característica destrutiva entre a onda incidente e a onda emergente do absorvedor, na interface do mesmo com o ar. O método é largamente utilizado na produção dos materiais ditos ressonantes e é ilustrado na Figura 3. Este tipo de absorvedor apresenta um bom desempenho, porém são efetivos em faixas muito estreitas de frequência.

Esse tipo de característica é vista na estrutura de Salisbury que, segundo Marinho (2010), consiste em uma estrutura onde um material resistivo é posicionado a uma distância do comprimento de onda da radiação incidente acima do material laminado, conforme apresentado na Figura 3. A resistência elétrica desse material é igual a $Z_0 = 377\Omega$, equivalente a impedância do ar. Neste comprimento de onda, a radiação incidente e a refletida no material se cancelam, promovendo interferência destrutiva. O cancelamento ocorre porque as ondas estão com as fases invertidas em 180° . Esse cancelamento só é observado, quando o MARE apresenta 25% do comprimento de onda incidente em espessura.

Figura 3 – Ilustração da estrutura de Salisbury em material espesso, o qual é composto de uma película resistiva e MARE com comprimento de 25% da onda incidente.

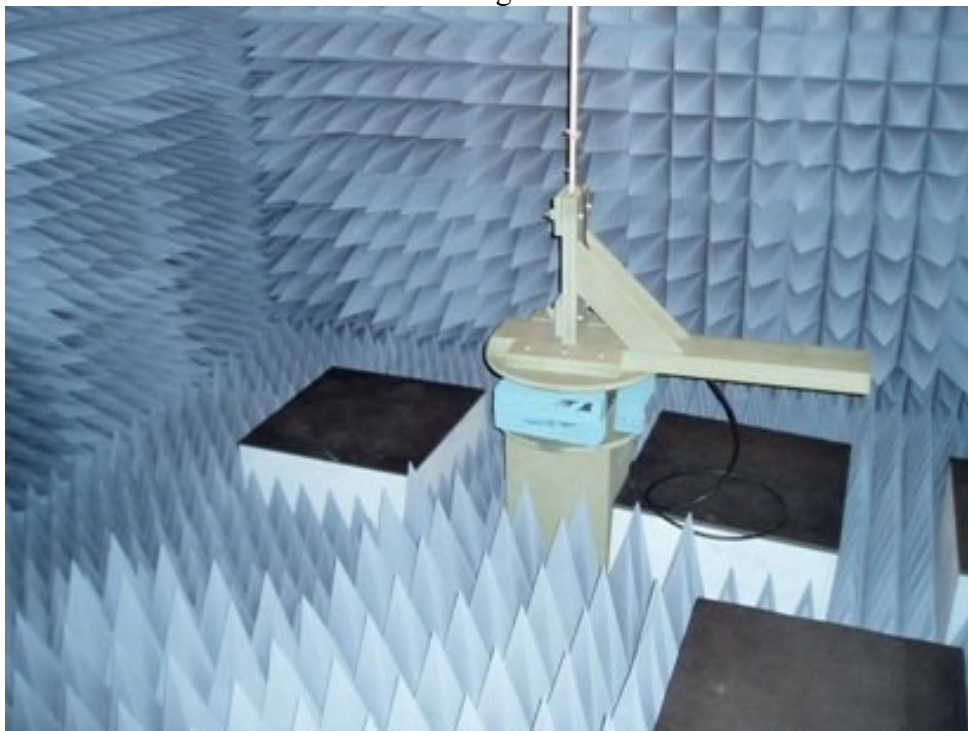


Fonte: COHN; DALY e PARKER, 1995.

2.2.2. Espalhamento da onda eletromagnética

Essa técnica é a mais utilizada quando o interesse é reduzir o eco-radar, ou seja a representação de aeronave obtida por radar primário ou secundário, pelo efeito físico de espalhamento da onda refletida em direções diferentes da antena receptora. Absorvedores do tipo piramidal, comumente encontrados em câmaras anecóicas, como mostrado na Figura 4, utilizam essa técnica. Além disso, outros fenômenos de perdas ocorrem neste tipo de estrutura tais como reflexões múltiplas nos poros do absorvedor e perdas ôhmicas promovidas pelo negro de fumo impregnado nesse tipo de absorvedor (MARINHO, 2010).

Figura 4 – Imagem ilustrativa de uma câmara anecóica utilizada em testes de interferência eletromagnética.



Fonte: Página da Universidade de Engenharia da Universidade do Porto.¹

¹ Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~ee99051/pstfc/camara.html>. Acesso em: Outubro/2017.

2.2.3. Utilização de materiais com perdas elétricas e magnéticas

A utilização de materiais com perdas magnéticas e elétricas envolve, de uma maneira geral, a atenuação da energia da onda eletromagnética incidente pela conversão da energia da onda em calor, no interior do absorvedor. Neste caso, é necessário ajustar a impedância da superfície do absorvedor de forma que a onda incidente penetre nesse material (GAMA et al., 2007).

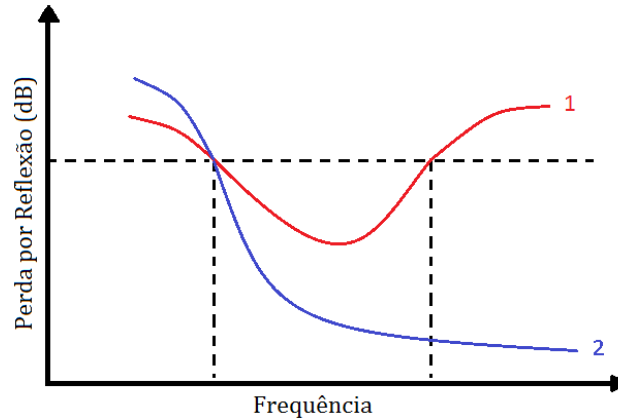
Os absorvedores mais eficientes são aqueles que associam mais de um fenômeno de perdas em seu processamento. Entretanto, são economicamente inviáveis, devido, principalmente, à necessidade de investimento em pesquisa e desenvolvimento científico.

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética, em geral, são constituídos de materiais dielétricos e/ou magnéticos, que quando processados de maneira conveniente promovem altas perdas de energia em determinadas faixas de frequências (SIMAS, 2016).

Rezende, Martin e Silva (2000) em conjunto com Gonçalves (2016) alegam que os absorvedores são divididos, de acordo com a faixa de frequência na qual absorvem, em banda estreita ou ressonante: tipo N (*Narrow*), e banda larga, tipo W (*Wide*), respectivamente.

A Figura 5 apresenta as curvas de absorção típicas, obtidas pelo uso destes dois tipos de absorvedores. Os absorvedores do tipo N apresentam apenas uma frequência ou pequena faixa de frequências na qual produzem efetiva atenuação. Por outro lado, os absorvedores do tipo W, atenuam a radiação eletromagnética incidente em uma faixa mais ampla de frequência, como é possível observar na Figura 5. A aplicabilidade destes absorvedores é dependente da banda na qual absorvem (SOETHE, 2009).

Figura 5 – Curvas características de absorção para absorvedores do tipo N (1) e W (2).



Fonte: FREIRE et al., 2016.

Em materiais de única fase, a absorção é, frequentemente, do tipo W, apresentando propriedades homogêneas com a incorporação de partículas magnéticas. Por outro lado, os materiais de duas ou mais fases, apresentam uma dispersão de carga com propriedades magnéticas ou elétricas em uma matriz isolante. Essa dispersão altera as propriedades finais do material, influenciando a absorção apresentada pelo conjunto (FREIRE et al., 2017).

Quando a onda encontra um absorvedor, parte da radiação pode ser dissipada e/ou absorvida dependendo do fator de perda do material. A Tabela 2 exemplifica a relação entre a atenuação da reflexão (dB) e a porcentagem de absorção do sinal de radiação, ou seja, uma atenuação de apenas -3 dB é o equivalente a 50% de absorção (FAEZ et al., 2000).

Tabela 2 - Relação entre a atenuação do sinal refletido e porcentagem de energia absorvida

ATENUAÇÃO DA REFLEXÃO (dB)	ENERGIA ABSORVIDA (%)
0	0
-3	50
-10	90
-15	96,9
-20	99
-30	99,9
-40	99,99

Fonte: FAEZ et al., 2000, p. 134.

2.3. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS MAREs

Os MARE's são definidos por suas propriedades intrínsecas como permissividade elétrica (ϵ); permeabilidade magnética (μ), tangente de perda ($\tan \delta$) e impedância (Z) (SIMAS, 2016).

Tanto a permissividade elétrica (ϵ) quanto a permeabilidade magnética (μ) são dados por conjuntos complexos, os quais tem termos reais que são responsáveis pelo processo de armazenamento de energia e termos imaginários, responsáveis pelo processo de dissipação de energia dos campos elétrico e magnético incidentes (DIAS, 2000; SIMÕES, 2005; SOETHE, 2009; SIMAS, 2016).

A permissividade elétrica (ϵ) de um material é demonstrada pela Equação 1.

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

Sendo:

- ϵ' o termo real, ligado ao armazenamento de energia do campo elétrico incidente;
- ϵ'' o termo imaginário, ligado à dissipação do mesmo campo.

Analogamente, a permeabilidade magnética (μ) de um material é dada pela Equação

2.

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

Sendo:

- μ' o termo real, ligado ao armazenamento de energia do campo magnético incidente;
- μ'' o termo imaginário, ligado à dissipação do mesmo campo.

As equações 3 e 4 definem as tangentes de perda elétrica ($\tan \delta_e$) e magnética ($\tan \delta_m$), respectivamente. Trata-se de uma relação entre a energia relacionada com a dissipação e com o armazenamento no material. Esse procedimento foi primeiramente introduzido por Hakki e Coleman (1960) e mostra o quanto esse material dissipa a energia

que é incidida no mesmo. Quanto maior seu valor, maior é a dissipação de energia pelo material.

$$\operatorname{tg} \delta_e = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (3)$$

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

A resistência (Z) é a razão entre a permeabilidade magnética e permissividade elétrica do material e é dada pela Equação 5.

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

Simas (2016) afirma que para que um material não reflita uma radiação incidente em sua superfície, sua resistência (Z) deve ser semelhante à impedância de espaço livre (Z_0), da ordem de 377Ω , como pode ser observado na 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.

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

Soethe (2009), Simões (2012) e Lee (1991) afirmam 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, algo que é evidenciado na Equação 7.

2.4. ABSORVEDORES MAGNÉTICOS

Segundo Dias (2000), nos MAREs magnéticos as propriedades de maior interesse são a permeabilidade magnética (μ) e a permissividade elétrica (ε). Simões (2005) afirma que

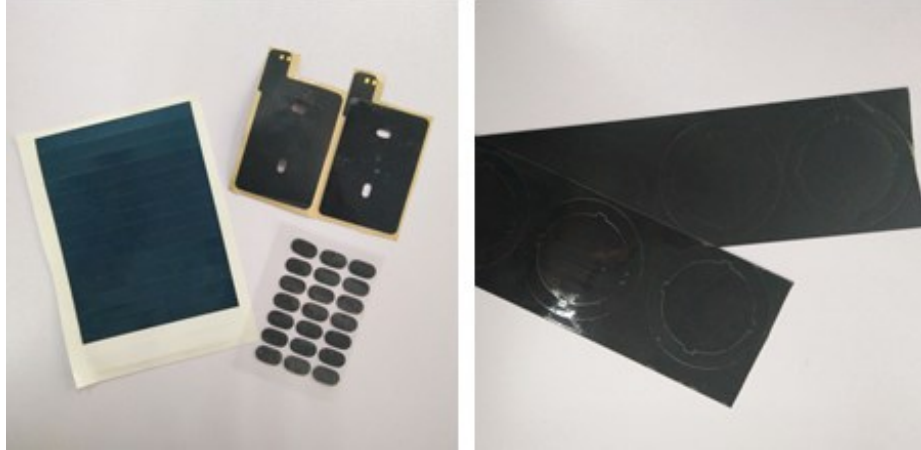
a absorção ocorre quando os elétrons tem sua velocidade de spin aumentada, fazendo com que o momento magnético dos átomos aumente, armazenando energia. A dissipação dessa energia armazenada ocorre quando os elétrons invertem seu spin, após atingir altas temperaturas.

Nestes absorvedores também é possível encontrar a participação do mecanismo dielétrico de absorção, que tem como principal vantagem uma menor espessura, mas, em contra partida, tem grande absorção numa faixa estreita de frequências, característica de material do tipo N (Simões, 2005).

MARE's magnéticos são constituídos principalmente de polímeros, como elastômeros à base de poliisopreno, neopreno, nitrilas, silicones e/ou polímeros poliuretânicos, fenólicos ou epoxídicos. Estes polímeros são aditivados com materiais com características magnéticas, como, por exemplo, as ferritas, compostos a base de Fe_2O_3 partículas de carbono e/ou polímeros condutores (DIAS, 2000).

Os absorvedores magnéticos são, normalmente, menos espessos, apresentando em alguns casos 1/10 da espessura dos absorvedores dielétricos. Na Figura 6 são apresentadas imagens deste tipo de absorvedor, evidenciando sua espessura reduzida, que torna sua aplicação viável, principalmente no uso de blindagem para componentes eletrônicos, que demandam espessuras pequenas. No entanto, as características de absorção destes materiais são equivalentes às dos absorvedores dielétricos (International Encyclopaedia of Composites, 1991).

Figura 6 – Ilustração de materiais absorvedores adesivos do tipo magnéticos de diversos tamanhos, para aplicações de blindagens de componentes eletrônicos.



Fonte: Site da empresa Shenzhen PH Functional Materials Corp. Ltda.²

Esse tipo de material, que possui como aditivo principalmente a ferrita, tem uma relação entre a sua quantidade e a quantidade de matriz polimérica bastante variada, podendo atingir teores de ferrita de até 80% em massa ou mais (CHO, 1998). A quantidade de ferrita depende do nível de absorção e da frequência de trabalho pretendida em cada aplicação, seja em câmaras anecóicas ou até aplicações em blindagem de equipamentos para o setor de telecomunicações (SIMÕES, 2005).

2.5. ABSORVEDORES DIELÉTRICOS

Materiais que induzem ou podem ser induzidos a apresentar uma estrutura do tipo dipolo elétrico, separando as cargas positivas das negativas são considerados MARE's dielétricos (SOETHE, 2009). A propriedade de maior interesse nesse tipo de MARE é a permissividade elétrica (ϵ), que qualitativamente relaciona-se com a capacidade de um material se polarizar quando exposto a um campo elétrico (SIMÕES, 2005).

² Disponível em: <http://www.szphfm.com/emc-absorber-materials-magnetic-fabric-magnetic-material-p3262.html>. Acesso em: Outubro/2017.

As superfícies dielétricas normalmente utilizadas no setor aeronáutico como estruturas absorvedoras de radiação constituem-se de plásticos reforçados, como por exemplo, laminados de compósitos poliméricos tais como: resinas epóxi, fenólica, bismaleimida, poliuretanos, poliimidas, silicone. Tais polímeros podem ser rígidos ou flexíveis e apresentam-se nas formas de mantas ou espumas (LEE, 1991; CHO, 1998), sendo que alguns desses materiais podem ser vistos na Figura 7.

Figura 7 – Materias absorvedores do tipo dielétrico de tamanho próximo a uma bola de golfe, sendo polímeros e espumas para antenas, guias de onda e telecomunicações.



Fonte: Site da empresa Mica-Tron Products Corp.³

Os MARE dielétricos podem ter aditivos diferentes em seu núcleo como, por exemplo, o negro de fumo, $BaTiO_3$ ou TiO_2 . Estes aditivos aumentam a condutividade elétrica dos materiais compósitos, que garantem que o mesmo não seja um refletor de radiação eletromagnética (NOHARA, 2003; YANG et al, 2016; SAINI & ARORA, 2012).

³ Disponível em: <http://www.mica-tron.com/dielectrics.php>. Acesso em Outubro/2017.

2.6. MATERIAIS COMPÓSITOS

Compósitos são materiais que tem em sua composição dois ou mais constituintes com propriedades químicas e/ou físicas distintas. Apresentam fases constituintes definidas como fase contínua e descontínua, respectivamente, matriz e reforço. Estes materiais apresentam propriedades químicas e/ou físicas superiores a de seus componentes separadamente (MARINUCCI, 2011).

A matriz tem a função de proteger o produto contra efeitos ambientais ou abrasão, sendo responsável por manter a distribuição de tensões e a posição das fibras na orientação desejada para uma dada aplicação.

Segundo Marinucci (2011), a escolha do reforço é baseada no custo do material, no desempenho pretendido e na técnica de fabricação a ser empregada. Os reforços são normalmente fibras e sua orientação implica na isotropia do sistema. Na Tabela 3 pode-se observar uma comparação qualitativa em termos das mais variadas propriedades dos compósitos fabricados com fibras de aramida, carbono e vidro, sendo A uma propriedade com característica excelente, B uma propriedade com característica aceitável e C uma propriedade com característica baixa.

Tabela 3 – Propriedades comparativas dos reforços em fibras de aramida, carbono e vidro.

FIBRAS DE REFORÇO - PROPRIEDADES COMPARATIVAS			
	Aramida	Carbono	Vidro
Alta Resit. a Tração	B	A	B
Módulo de Tração	B	A	C
Resistência a Compressão	C	A	B
Módulo de Compressão	B	A	C
Resistência a Flexão	C	A	B
Módulo de Flexão	B	A	C
Resistência ao Impacto	A	C	B
Resist. Interlaminar ao Cisalhamento	B	A	A
Resistência ao Cisalhamento	B	A	A
Densidade	A	B	C
Resistência a Fadiga	B	A	C
Resistência ao Fogo	A	C	A
Isolamento Térmico	A	C	B
Expansão Térmica	A	A	A
Custo	C	C	A

A = Excelente B = Aceitável C = Baixo

Fonte: NASSEH, 2007.

A indústria aeronáutica, apesar de bem recente, é o berço de tecnologias inovadoras, sendo que é nela que o uso de materiais compósitos é mais expressivo. A aeronáutica de cunho militar utiliza materiais compósitos desde que o mesmo se tornou vantajoso na relação peso *versus* resistência, em meados de 1960 (MEGSON, 2013).

Simas (2016) e Gonçalves (2016) realizaram a laminação de um MARE a base de compósito em seu trabalho, utilizando como material absorvedor suas próprias fibras revestidas com dióxido de titânio, ou até aditivos dispostos na matriz. Ambos obtiveram resultados muito expressivos de absorção com a utilização desse arranjo de materiais, a estrutura de um compósito permite que ele fique disperso na matriz e isso o torna mais eficaz em sua absorção, tais resultados foram encontrados por Simas (2016) e Gonçalves (2016). E algo semelhante foi realizado no presente trabalho no qual foram adicionadas partículas de TiO_2 e Fe_2O_3 em uma matriz alquídica.

3. METODOLOGIA

A obtenção, preparo e caracterização das amostras consiste em uma importante etapa do presente trabalho. Neste capítulo são abordados tópicos relacionados à seleção dos aditivos, bem como da matriz polimérica e por fim, os equipamentos e técnicas adotadas para caracterização dos materiais obtidos na execução deste estudo.

3.1. MATERIAIS

Nessa seção serão abordados os materiais utilizados para a confecção das amostras bem como os critérios empregados para a escolha dos mesmos e suas propriedades.

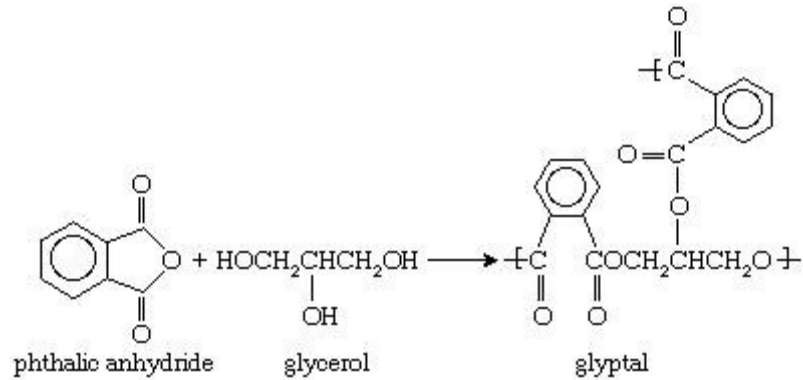
No presente trabalho é avaliada a aplicação de aditivos, já conhecidos como MARE, em um composto de grande utilização na indústria, a resina alquídica, que segundo Nanvae, Yahya e Gan (2009) é um dos materiais de revestimento com maior aplicação nas indústrias em geral, devido a seu comportamento versátil.

Assim sendo, optou-se por realizar a introdução de aditivos de dióxido de titânio e óxido férrico na resina alquídica de forma a obter um compósito absorvedor de radiação eletromagnética. Cabe ressaltar que tais aditivos são largamente empregados em pesquisas sobre MARE, como citado por Simas (2016), entretanto a adição destes elementos a uma matriz alquídica é algo novo nesse meio.

3.1.1. Resina alquídica

A resina alquídica é um complexo poliéster modificado com óleo que atua como agente formador de filme em algumas tintas e revestimentos transparentes (HOSCH, 2016). Segundo Hosch (2016) o nome alquídico é formado da palavra álcool e ácido, que denota sua origem química, baseada comumente na reação de polimerização entre um álcool, como o glicerol e um ácido dicarboxílico, por exemplo, o anidrido ftálico. Essa reação tem a estrutura química apresentada esquematicamente na Figura 8.

Figura 8 – Representação esquemática da estrutura química de formação de um composto alquídico.



Fonte: HOSCH, 2016.

A resina alquídica apresenta algumas propriedades de fabricação importantes como o tempo de cura, que é cerca de 5 horas, método de síntese, que é dado pela mistura de um óleo, glicerol e um catalizador que, após misturados, são aquecidos para obter a temperatura de polimerização e por fim é acrescentado o anidrido ftálico que finaliza o processo de esterificação. Temperatura e pressão de polimerização também são observadas e tem valores de 210 – 260 °C e 1 atm, respectivamente. Todos esses dados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Características de síntese da resina alquídica.

Síntese		
Estrutura do monômero	-	Polyol e ácido dicarboxílico ou anidrido
Massa molecular do monômero	g/mol	>1000
Presença de óleos ou ácidos graxos	%	>70 (Óleos muito longos); 56-70 (Óleos longos); 46-55 (Óleos médios); 35-45 (Óleos curtos)
Exemplo de formulação	% em Massa	glicerol - 25.9, óleo - 33.3 e anidrido phtalico - 40.8
Método de síntese	-	A mistura de óleo, glicerol e catalizador é aquecida para a temperatura requerida e o anidrido phtalico é adicionado para completar a esterificação.
Temperatura de polimerização	°C	210-260
Tempo para polimerização	horas	5
Pressão de polimerização	atm	1

Fonte: Autor (2017), adaptado de WYPYCH (2012).

Segundo Williams (2000), uma das maiores vantagens dessa resina é a variedade de estruturas as quais é compatível, desde outras resinas e solventes variados. O desempenho do composto alquídico pode ser alterado misturando-o ou reagindo-o com outros tipos de polímeros. Na Tabela 5 observa-se algumas modificações que podem ser realizadas na resina alquídica de forma a elevar sua aplicabilidade, ou seja, onde ela pode ser aplicada para que o uso seja aprimorado.

Tabela 5 - Modificações na resina alquídica para aprimoramento de aplicação.

Modificação	Propriedade primária melhorada nas tintas	Aplicações das tintas
Uretano alquídico	Resistência a abrasão	Pisos de madeira
Acrílico alquídico	Resistência a radiação UV	Decoração metálica
Silicone alquídico	Resistência ao calor e radiação UV	Sinais de exteriores
Stirenato alquídico	Dureza e alta taxa de secagem	Verniz de goma
Vinil tolueno alquídico	Compatibilidade com solventes alifáticos	Sprays aerossóis
Fenol alquídico	Capacidade de recobrimento e resistência a água	Primers e vernizes
Borracha de clorinato alquídica	Resistência caustica e secagem rápida	Tintas de trânsito
Blenda nitrocelulosica	Alto brilho e imagem	Móveis de madeira

Fonte: Autor (2017), adaptado de Williams (2000).

A resina alquídica utilizada no desenvolvimento do presente trabalho foi cedida pela empresa Anatin Tintas Industriais⁴, localizada na cidade de Guarulhos. Tal empresa atua no segmento aeroespacial a mais de trinta anos, agregando alta confiabilidade no processo de obtenção da resina.

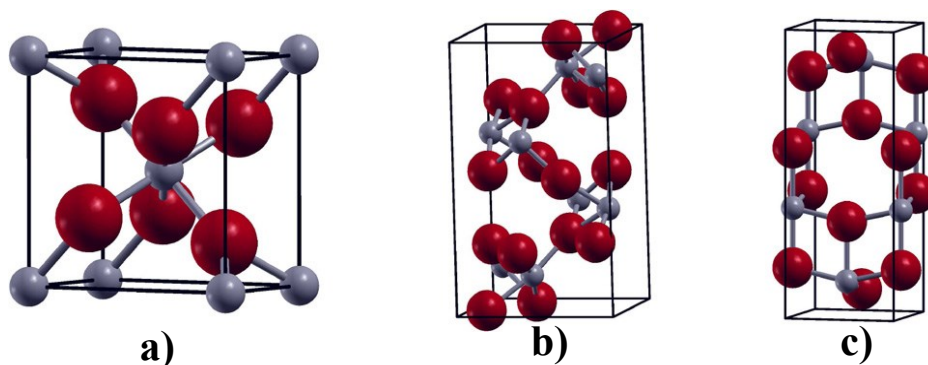
⁴ Disponível em: <<http://anatin.com.br/>>. Acesso em: 22 Out. 2017.

3.1.2. Dióxido de Titânio (Anatase)

A escolha do dióxido de titânio (TiO_2), foi pautada na pesquisa de Singh et al. (2010), no qual se caracteriza o TiO_2 de fase anatase com um aditivo magnético, chamado maghemita, ambos adicionados a uma matriz polimérica de polianilina, com características condutoras. Esse compósito foi capaz de absorver mais que 99,99% da radiação eletromagnética incidente, se mostrando um excelente absorvedor.

O dióxido de titânio (TiO_2), de acordo com Landmann, Rauls e Schmidt (2012) é um composto cristalino que pode se apresentar em distintas fases: rutilo, anatase e brookita. O arranjo espacial e a estrutura cristalina característica de cada uma destas fases pode ser observada esquematicamente na Figura 9.

Figura 9 – Demonstração esquemática das células unitárias das fases a) rutilo, b) brookita e c) anatase do dióxido de titânio.



Fonte: ESCH; GADACZEK; BREDOW, 2013.

O composto é um material semicondutor com alta estabilidade, não tóxico ambientalmente e de baixo custo. Somente o rutilo e a anatase tem um papel significativo em aplicações industriais, a brookita é muito limitada devido à dificuldade de preparação e sua escassez (LANDMANN; RAULS; SCHMIDT, 2012).

Segundo Soethe (2009), o TiO_2 é um bom absorvedor devido sua alta permissividade elétrica (ϵ). Além disso, apresenta característica dielétrica, possui alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão, tornando sua aplicação favorável também em ambientes extremos.

Na Figura 10 é apresentada uma imagem relativa ao pó de dióxido de titânio na fase anatase utilizado no presente trabalho, que foi cedido pela empresa IQBC – Produtos

Químicos Ltda. Empresa, que é referência na fabricação e revenda de produtos químicos no Brasil.

Figura 10 – Imagem ilustrativa do pó de dióxido de titânio utilizado no trabalho.



Fonte: Enciclopédia colaborativa Wikipedia.⁵

3.1.3. Óxido Férrico

O óxido férrico é utilizado em diversas pesquisas como um aditivo magnético, devido a sua alta permeabilidade magnética, sendo assim, capaz de interagir com o campo magnético da radiação eletromagnética (KUMAR et Al, 2013).

Zhong et al. (2017), por exemplo, sintetizou um compósito em hidrogel com carga magnética de óxido férrico com excelentes capacidades absorvedoras, bem como Singh et al. (2008). A estrutura Fe_2O_3 apresenta vários polimorfos, sendo os principais as fases α e γ . No

⁵ Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_dioxide. Acesso em: 21 Out. 2017.

presente trabalho utiliza-se a fase α , por ser a mais abundante na natureza, sendo extraída da hematita.

A aplicação de tais materiais como MARE motivaram a utilização de óxido férrico como um dos aditivos aplicados a resina alquídica no presente trabalho, favorecendo mecanismos de perda magnética no compósito. O óxido férrico foi cedido pelo Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) e uma imagem ilustrativa do mesmo pode ser visualizada na Figura 11.

Figura 11 – Imagem ilustrativa do pó de óxido férrico utilizado no trabalho.



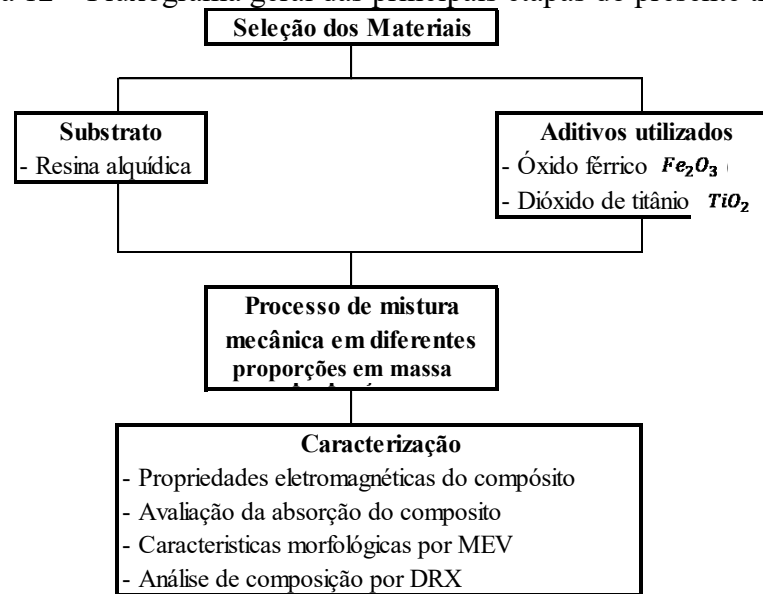
Fonte: Enciclopédia colaborativa Wikipédia.⁶

⁶ Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_de_ferro\(III\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_de_ferro(III)). Acesso em: 21 Out. 2017.

3.2. MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os procedimentos experimentais, bem como os equipamentos utilizados para a realização das caracterizações nos materiais desenvolvidos no presente trabalho. Na Figura 12 é apresentada de forma esquemática a metodologia empregada

Figura 12 – Fluxograma geral das principais etapas do presente trabalho.



Fonte: Autor (2017).

Foram confeccionadas amostras do compósito de matriz alquídica, com diferentes proporções de aditivos com a finalidade de avaliar a influência de cada particulado, bem como o tipo de absorção que cada um promoveria. Foram fabricadas doze amostras, com diferentes combinações destes parâmetros, como apresentado esquematicamente na Tabela 6.

Tabela 6 – Proporções em massa dos aditivos presentes nas amostras dos compósitos produzidos neste trabalho.

NÚMERO DAS AMOSTRAS	ÓXIDO FÉRRICO	DIÓXIDO DE TITÂNIO	RESINA ALQUÍDICA
1	6.67% (0,50 g)	26.67% (2,00 g)	66.67% (5,00 g)
2	7.40% (0,50 g)	18.50% (1,25 g)	74.10% (5,00 g)
3	8.33% (0,50 g)	8.33% (0,50 g)	83.33% (5,00 g)

4	20.00% (1,25 g)	0.00% (0,00 g)	80.00% (5,00 g)
5	15.15% (1,25 g)	24.24% (2,00 g)	60.60% (5,00 g)
6	16.67% (1,25 g)	16.67% (1,25 g)	66.67% (5,00 g)
7	18.50% (1,25 g)	7.40% (0,50 g)	74.10% (5,00 g)
8	0.00% (0,00 g)	20.00% (1,25 g)	80.00% (5,00 g)
9	22.22% (2,00 g)	22.22% (2,00 g)	55.55% (5,00 g)
10	24.24% (2,00 g)	15.15% (1,25 g)	60.60% (5,00 g)
11	26.67% (2,00 g)	6.67% (0,50 g)	66.67% (5,00 g)
12 (REF.)	0.00% (0,00 g)	0.00% (0,00 g)	100.00% (5,00 g)

Fonte: Autor, 2017.

3.2.1. Síntese do Compósito

As amostras de compósitos foram fabricadas de acordo com uma especificação de massa, elaborada pelo autor, sendo que estas especificações podem ser observadas na Tabela 6. Pode-se, por meio desta tabela, verificar em porcentagem a quantidade de cada material utilizado para a fabricação dos compósitos sendo que tais teores foram definidos de forma a observar a influência de cada um dos aditivos no material obtido.

Depois de pesados em uma balança de precisão, os materiais foram criteriosamente separados. Em temperatura ambiente, com auxílio de um misturador mecânico (Figura 13), a resina foi misturada criteriosamente com as respectivas quantidades de aditivos até a completa homogeneidade da mistura.

Figura 13 – Imagem ilustrativa de um agitador magnético de temperatura controlada.

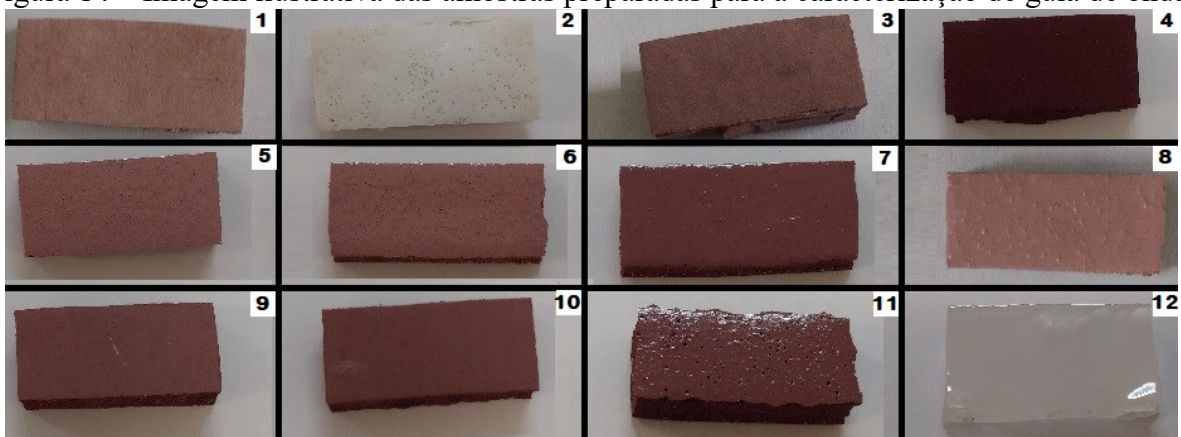


Fonte: Site de vendas AliExpress.⁷

Depois de homogeneizada, a resina aditivada foi colocada em um recipiente próprio para a cura do material. Este processo ocorreu por 24h, devido à espessura da amostra e da quantidade de aditivos.

Após o processo de cura, as amostras foram cortadas de acordo com o tamanho necessário para cada caracterização. Na Figura 14 é apresentada uma imagem ilustrativa das amostras após o processo de corte, para caracterização em guia de onda sendo que os números relativos às amostras dizem respeito as concentrações de aditivos apresentadas na Tabela 6.

Figura 14 – Imagem ilustrativa das amostras preparadas para a caracterização de guia de onda.



Fonte: Autor, 2017.

⁷ Disponível em: https://www.aliexpress.com/price/lab-heat-plate_price_2.html. Acesso em: 21 Out. 2017.

A coloração rosada das amostras da Figura 14 se deve os diferentes teores de cada aditivo utilizado sendo a amostra 2, a que contém apenas dióxido de titânio, a amostra 4, aquela composta somente de óxido férrico e a amostra 12 que é a referência, contendo apenas a resina alquídic em sua composição.

3.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

Com o intuito de visualizar a microestrutura do material, a porosidade e a aglomeração do particulado no compósito, foi realizada uma análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), por meio de um equipamento da marca Leo, modelo 435 VPi, com operação em pressão variável ilustrado na Figura 15. Estas análises foram realizadas na Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), pertencente ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) em São José dos Campos.

Figura 15 – Imagem ilustrativa do Microscópio eletrônico de varredura, da marca LEO e modelo 435 VPi.



Fonte: Site Institucional do IAE/AMR – LEMEV.⁸

⁸ Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/lfn/instrumentos.html>. Acesso em: 21 Out. 2017.

Com esta análise é possível avaliar as características topográficas das amostras sendo que o contraste é dado em função do relevo. Todas as imagens foram realizadas nos modos BSE (*backscattering electron* – retroespalhada) e SE (*secondary electron* - secundária), com aumentos de 50x, 200x e 1000x.

3.2.3. Difração de Raios-X

A caracterização estrutural detalhada de compostos geralmente é realizada por métodos de difração, que podem fornecer não apenas informações sobre a composição e ligações químicas, mas também parâmetros geométricos complexos (CLEGG, 2003).

Segundo Moudgil (2010) a técnica de difração de raios-X (DRX) é importante pois permite obter o espaçamento médio entre as camadas ou linhas de átomos, bem como possibilita determinar a orientação de um único cristal ou grão. Além disso, esta técnica é útil para determinar a estrutura cristalina de um material desconhecido e medir o tamanho, forma e pequenas tensões internas em regiões cristalinas.

No presente trabalho, esta técnica foi utilizada com a finalidade de realizar a caracterização da estrutura cristalina dos aditivos (Dióxido de Titânio e Óxido Férrico). Os testes foram conduzidos no Laboratório de Difração e Fluorescência de Raios X (LDFRX), na Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço – AMR/IAE em São José dos Campos/SP. Uma imagem ilustrativa do equipamento pode ser observada na Figura 16.

Figura 16 – Laboratório de Difração e Fluorescência de Raios X do IAE/DCTA.



Fonte: Site Institucional do IAE/AMR – LDFRX.⁹

Após esses resultados, deve-se tratá-los de modo que encontremos informações sobre sua estrutura cristalina. Para tal, foi utilizado o software PANalytical X'Pert HighScore Plus, que é composto de uma vasta biblioteca de referências, para comparação de resultados e tratamento de dados. Ao analisar os difratogramas, pode-se mapear os picos e compará-los com estruturas já existentes em sua base de dados e assim avaliar a composição do compósito.

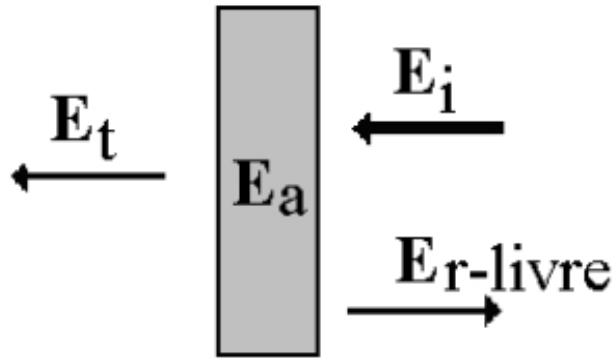
3.2.4. Caracterização por Guia de Onda

O princípio da caracterização de MARE's em guia de onda está esquematizado na Figura 17 e envolve a determinação da energia transmitida (E_t) e da energia refletida ($E_{r-livre}$) permitindo realizar o cálculo da energia absorvida (E_a) pelo material. Para tal, utiliza-se o conceito da conservação de energia (SIMÕES, 2005, p. 20) e a forma de cálculo da mesma é dada pela Equação 8.

$$E_i = E_{r-livre} + E_t + E_a \quad (8)$$

⁹ Disponível em: <http://www.iae.cta.br/index.php/laboratorios/252-ldfrx-laboratorio-de-fluorescencia-e-difracao-de-raios-x>. Acesso em: 21 Out. 2017.

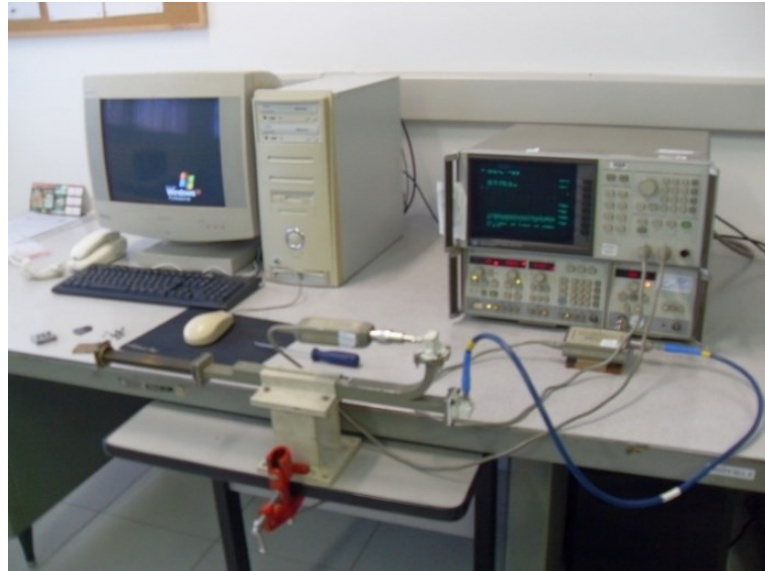
Figura 17 – Esquema geral do princípio da conservação da energia eletromagnética incidente sobre um determinado material, para cálculo da energia absorvida pelo mesmo.



Fonte: SIMÕES, 2005, p. 21.

As análises de guia de onda foram realizadas no Laboratório de Caracterização Eletromagnética do AMR/IAE/DCTA em São José dos Campos. Neste equipamento, o guia de onda é acoplado a um analisador de rede vetorial, modelo 8510C, do fabricante Agilent Technologies, o qual é conectado a um gerador de frequências e a um equipamento S-parameter Test Set Hewlett Packard 8515 A sendo que ambos os equipamentos podem ser visualizados na Figura 18. Para a avaliação das magnitudes de reflexão, transmissão e absorção da onda 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) (SIMAS, 2016).

Figura 18 – Imagem ilustrativa do equipamento de guia de onda utilizado para caracterização da absorção de radiação eletromagnética entre 8,2–12,4 GHz.



Fonte: QUADROS, 2014, p. 49.

Por meio deste equipamento também é possível caracterizar as amostras quanto as suas propriedades de permeabilidade magnética e permissividade elétrica, que são utilizadas para o cálculo dos parâmetros como tangente de perda elétrica e magnética. Tais parâmetros permitem definir a natureza da perda, ou seja, possibilitam avaliar se o aditivo é um absorvedor do tipo dielétrico ou magnético.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

- Avaliação da estrutura cristalina dos aditivos utilizados no presente trabalho;
- Avaliação da distribuição do dióxido de titânio e óxido férrico no compósito;
- Avaliação da influência do dióxido de titânio nas propriedades absorptivas;
- Avaliação da influência do óxido férrico nas propriedades absorptivas;
- Comparação do percentual de energia eletromagnética absorvida pelos compósitos obtidos.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA CRISTALINA DOS ADITIVOS

As análises de DRX dos aditivos dióxido de titânio e óxido férrico podem ser observadas nas Figura 19 e Figura 20, que evidenciam a distribuição de feixes refratados, registrados em um espectro de intensidade versus 2θ , que é o ângulo do detector no difratômetro (COMPTON; ALLISON, 1967). Foi possível obter então, o tipo de estrutura, bem como a identificação dos picos em cada análise sendo estes resultados apresentados nas Figura 19 e Figura 20.

Figura 19 – Figura ilustrativa da comparação dos picos do óxido férrico analisado, com a hematita encontrada na base de dados do programa.

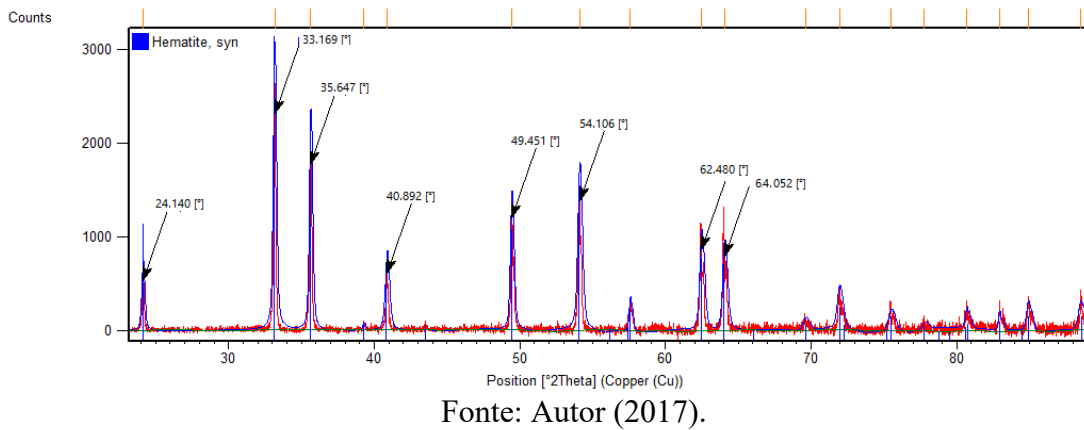
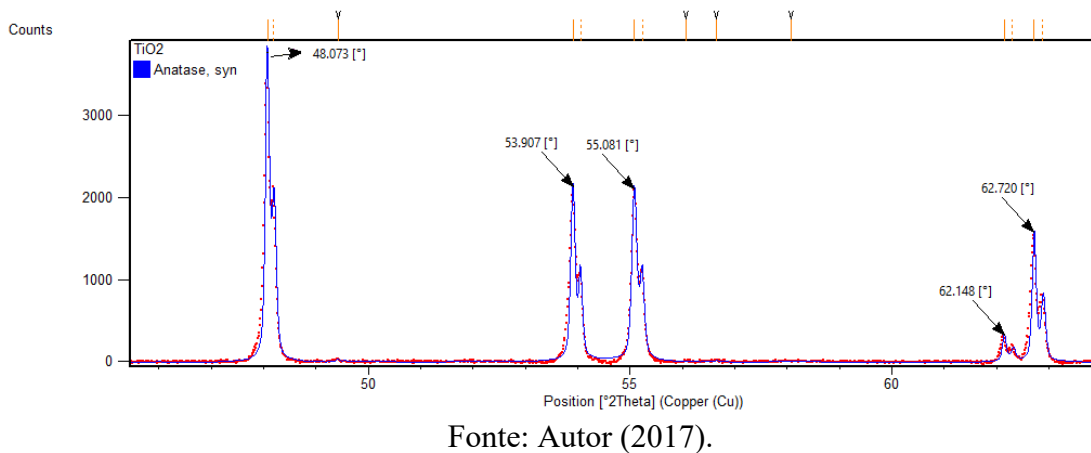


Figura 20 – Figura ilustrativa da comparação dos picos do dióxido de titânio analisado, com a anatase encontrada na base de dados do programa.



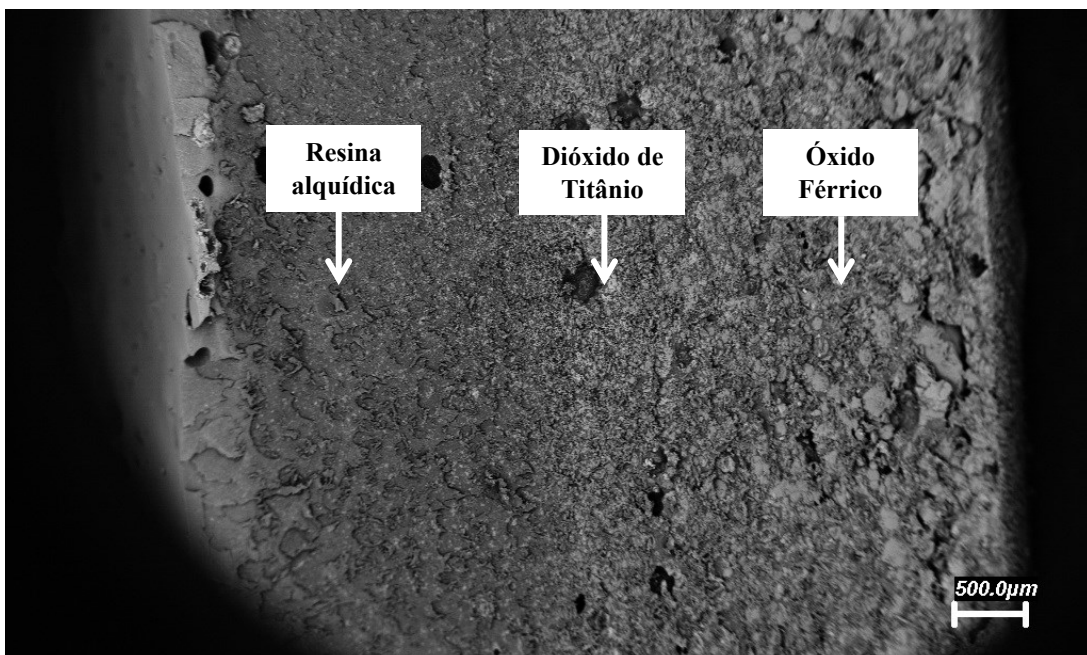
Avaliando-se os difratogramas e comparando com o banco de dados do software de análise, verifica-se que, com uma confiabilidade maior que 97%, os aditivos utilizados para a manufatura dos compósitos tratavam-se unicamente do dióxido de titânio de fase anatase, que possui estrutura cristalina tetragonal e o óxido férrico de fase hematita, que possui estrutura cristalina romboédrica. Tais resultados corroboram com aqueles encontrados nos estudos realizados por Kumar et. al (2013) e Zhou et al. (2011).

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO COMPÓSITO

De forma a analisar a característica superficial dos compósitos, foi realizada a análise por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em todas as amostras. Essa caracterização foi feita de modo a identificar a distribuição dos aditivos na matriz do compósito, bem como a morfologia superficial do mesmo.

Na Figura 21 pode-se observar uma micrografia lateral das amostras. De acordo com esta imagem, devido ao processo de preparação das amostras e ao tempo de cura da resina alquídica, é possível observar a aglomeração de aditivos na face inferior do corpo de prova, ou seja, devido à força da gravidade, o aditivo decanta. É possível encontrar uma maior concentração de óxido férrico na superfície da amostra, devido a sua maior massa atômica, se comparada ao dióxido de titânio. Afirma-se isso devido a diferença de contraste entre cada aditivo, fenômeno explicado pelas diferenças de interação entre o feixe de elétrons com os materiais com naturezas magnéticas e elétricas. (DEDAVID et al., 2007)

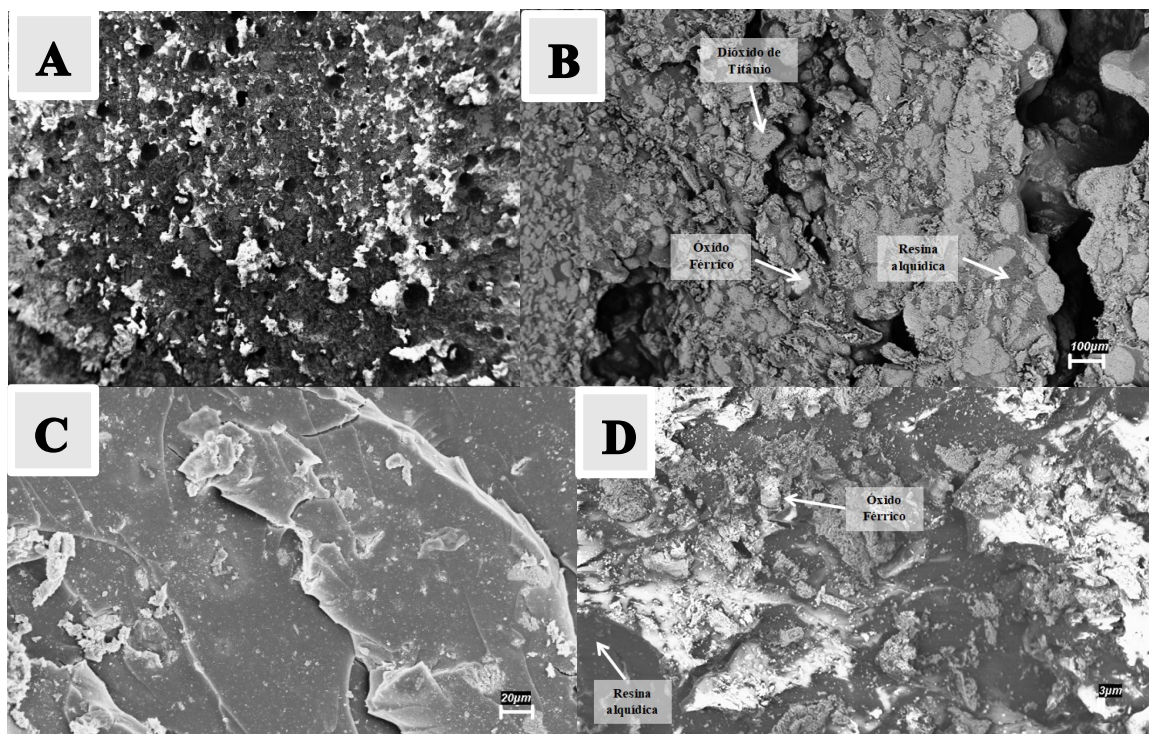
Figura 21 – Microscopia eletrônica de varredura da amostra com 1,25g de TiO_2 e 1,25g de Fe_2O_3 , com aumento de 50x, evidenciando a distribuição dos aditivos.



Fonte: Autor (2017).

Na Figura 22 é observado o MEV de diversas amostras sendo que em cada uma delas é possível evidenciar a morfologia superficial, bem como a distribuição dos aditivos presente no compósito.

Figura 22 – Microscopia eletrônica de varredura: A) Amostra 11, com 0,50g de TiO_2 e 2,00g de Fe_2O_3 e com aumento de 50x. B) Amostra 2, com 1,25g de TiO_2 e 0,50g de Fe_2O_3 e com aumento de 1000x. C) Amostra 3, com 0,50g de TiO_2 e 0,50g de Fe_2O_3 e com aumento de 1000x. D) Amostra 4, com 0,00g de TiO_2 e 1,25g de Fe_2O_3 e com aumento de 1000x.



Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Figura 22(A) pode-se verificar uma pronunciada rugosidade na amostra. Esse tipo de estrutura pode contribuir para o espalhamento da radiação eletromagnética incidente, auxiliando o fenômeno de redução da energia refletida. Este tipo de espalhamento é muito comum em fenômenos ópticos e é conhecido como *scattering*. Ainda, por meio desta figura, é possível observar a grande presença de poros na estrutura da matriz. Estes poros devem-se ao processo de confecção das amostras nas quais bolhas de ar são geradas dentro da resina. Todos estes poros podem atuar como pontos de espalhamento da radiação eletromagnética incidente auxiliando os fenômenos de absorção.

Na Figura 22, em geral, é possível evidenciar a disposição dos aditivos particulados em meio à resina. Devido ao contraste de composição, como descrito por Maliska (2003), que demonstra que cada particulado interage de maneira diferente com o elétron, é possível a caracterização dos aditivos imersos no compósito.

Em consequência da maior condução do particulado magnético (Fe_2O_3), esse é observado nas imagens, como sendo mais escuro que o particulado dielétrico (TiO_2), que é um pouco mais esbranquiçado que o óxido férrico. A resina alquídica é o material que preenche o meio, e se apresenta como sendo a maior parte do compósito em todas as imagens.

4.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS DAS AMOSTRAS

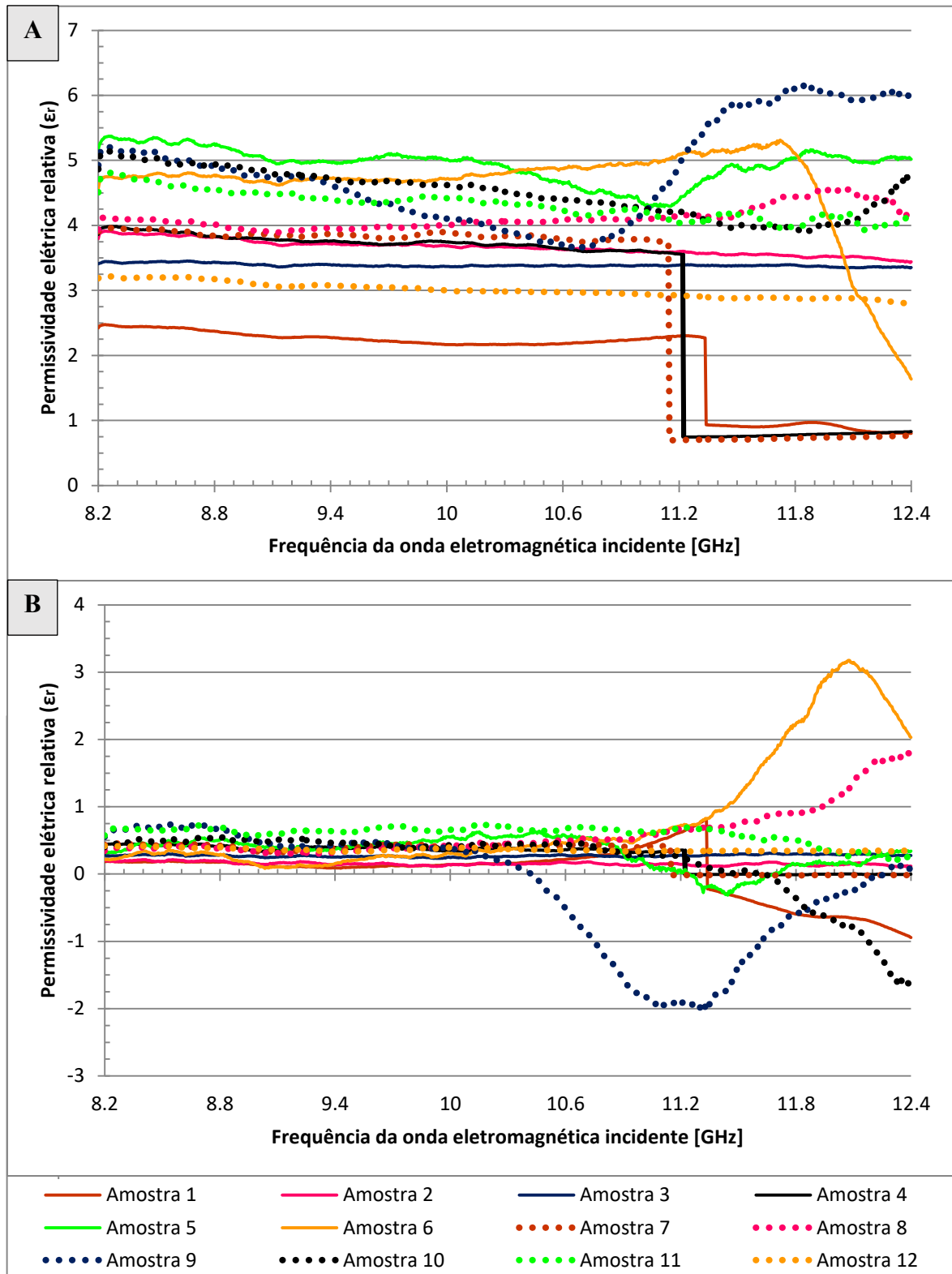
Os compósitos confeccionados foram submetidos à caracterização por guia de onda, na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz. Essa caracterização fornece resultados de absorção da radiação eletromagnética apresentada pelo material, bem como os valores de permeabilidade magnética e permissividade elétrica. Na seção 2.3 é discutido o princípio de funcionamento de um absorvedor de radiação eletromagnética, bem como suas propriedades intrínsecas, que estão relacionadas com os valores complexos de permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ). A análise dessas propriedades permite intuir o mecanismo de dissipação e armazenamento do material.

De acordo com a Equação 1, pode-se verificar que a permissividade elétrica (ϵ) de um composto é dada por um termo real e outro imaginário. Na Figura 23 é apresentada esta distribuição de permissividades reais e imaginárias. Os valores apresentados pelos eixos das abcissas são dados em gigaHertz, e representam a frequência da radiação eletromagnética incidente. Por outro lado, os valores apresentados no eixo da ordenada são valores adimensionais dados em função da permissividade elétrica no vácuo (SIMÕES, 2017), como a Equação 9 demonstra:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (9)$$

Sabe-se que $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} [F/m]$ (GRIFFITHS, 1999).

Figura 23 – Distribuição da permissividade elétrica complexa das amostras de compósito, A – Parte real (ϵ') e B – Parte imaginária (ϵ'').



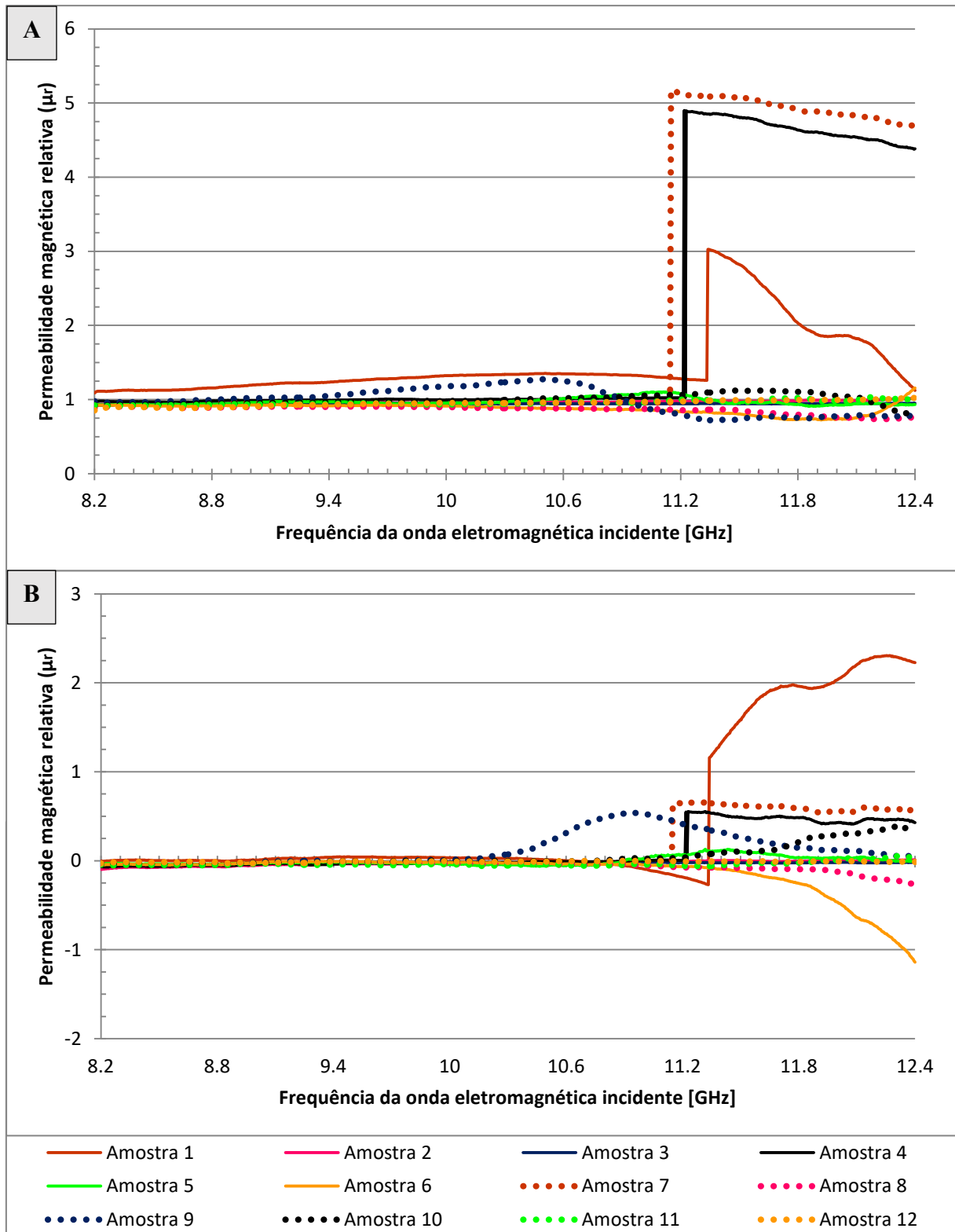
Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Equação 2 pode-se verificar que a permeabilidade magnética (μ) de um composto é dada por um termo real e outro imaginário. O comportamento da permeabilidade magnética real e imaginária pode ser observado na Figura 24. Os valores apresentados pelos eixos das abcissas são dados em gigaHertz, e representam a frequência da radiação eletromagnética incidente. O eixo das ordenadas apresenta os valores adimensionais dados em função da permeabilidade magnética no vácuo (SIMÕES, 2017), calculado a partir da Equação 10.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (10)$$

Sabe-se que $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [N/A}^2\text{]}$ (GRIFFITHS, 1999).

Figura 24 – Distribuição da permeabilidade magnética complexa das amostras de compósito, A – Parte real (μ') e B – Parte imaginária (μ'').

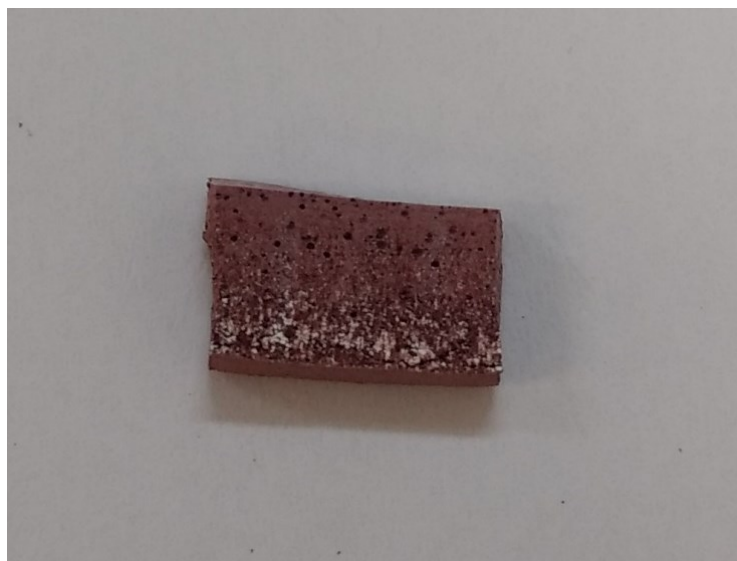


Fonte: Autor (2017).

Analisando os gráficos das Figura 23(A) e Figura 24(A), que representam a capacidade de armazenamento dos campos elétrico e magnético da onda eletromagnética, respectivamente, é possível observar que são complementares entre si. De modo que mesmo tendo aditivos do tipo magnético e dielétrico numa dada amostra, apenas um tipo de centro absorvedor irá se pronunciar.

Devido à falta de homogeneização das amostras após o período de cura, verifica-se que algumas características dos materiais, como o carácter magnético ou dielétrico foram observadas, mesmo a amostra apresentando alto teor de óxido férrico ou dióxido de titânio. Essa falta de homogeneização observada por microscopia eletrônica de varredura acarreta na formação de diferentes fases sobre o compósito, proporcionando grande heterogeneidade de propriedades no conjunto. As amostras com alto teor de anatase apresentaram características de armazenamento de energia elétrica, entretanto, apenas algumas amostras com alto teor de óxido férrico, de fase hematita, apresentaram características de armazenamento de energia magnética. Esse fenômeno pode ser explicado, devido ao efeito da falta de homogeneidade das amostras, que pode ser também visualizada a olho nu, como mostrado na Figura 25, que evidencia um corpo de prova em perfil.

Figura 25 – Fotografia do plano lateral da Amostra 11, evidenciando a heterogeneidade da composição.

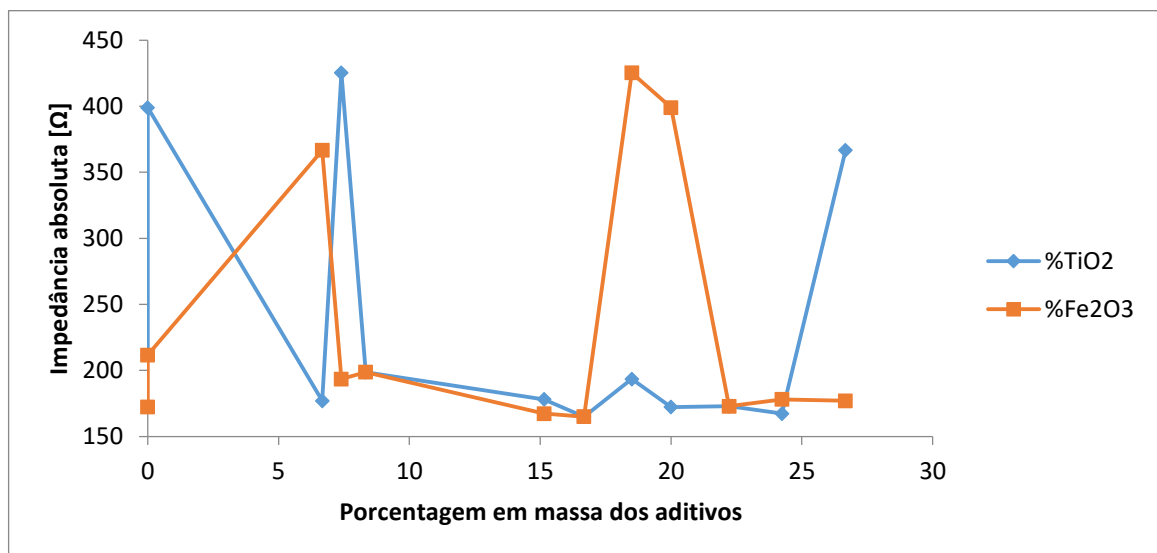


Fonte: Autor (2017).

Ao analisar aos gráficos das Figura 23(B) e Figura 24(B), que representam a capacidade de dissipação da energia elétrica e magnética, respectivamente, verifica-se que o caráter dissipativo de energia, seja elétrica ou magnética, só é dado a partir de uma frequência superior a 10 GHz. Evidencia-se por esses gráficos que o material não possui características dominantes de dissipação, ou seja, se o mesmo apresentar composto magnético, haverá dissipação magnética e se o mesmo apresentar composto dielétrico, haverá dissipação do campo elétrico, se houver ambos aditivos em seu meio, se apresentarão ambas as dissipações.

Com os dados de permeabilidade magnética e permissividade elétrica, em conjunto com a Equação 5 é possível obter a distribuição de impedância absoluta do material, como abordado na seção 2.3 quanto mais próximo da impedância do material e do meio livre (377Ω), maior a eficiência do MARE. Na Figura 26 é possível obter a distribuição de impedâncias médias do material de acordo com a proporção em massa de aditivos em seu meio.

Figura 26 – Distribuição de impedância médias das amostras, em ohms [Ω].

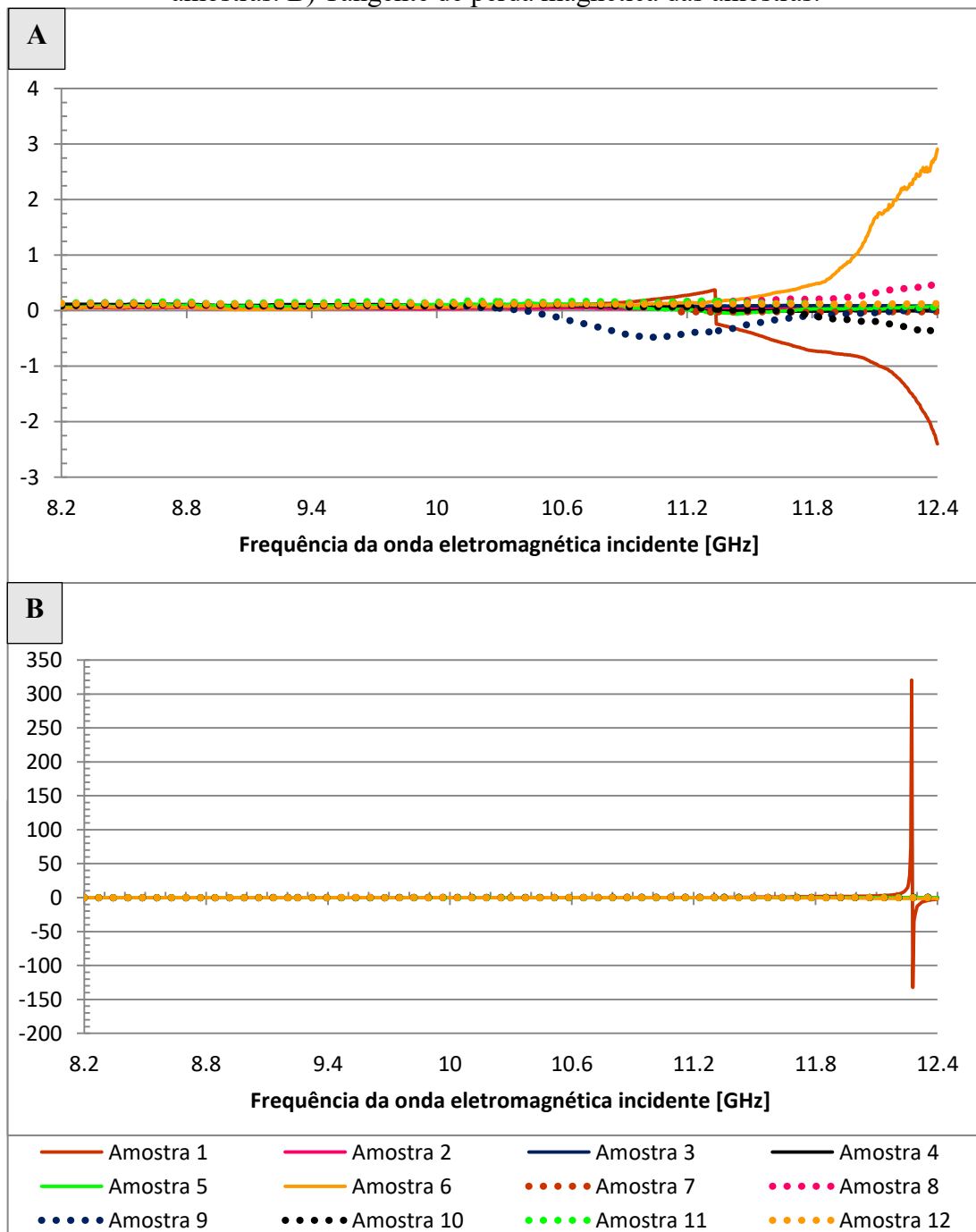


Fonte: Autor (2017).

Pelo gráfico da distribuição de impedâncias médias, da Figura 26, espera-se que a amostra com porcentagem de 26,67% de TiO_2 e 6,67% de Fe_2O_3 , ou seja, a amostra 1, tenha a maior absorção, espera-se tal relação por ser a impedância mais próxima do resultado de 377Ω , pois tem uma média de $366,6 \Omega$.

Depois de realizadas as análises nas componentes reais e imaginárias das propriedades do material, utilizou-se as Equações 3 e 4, para o cálculo das tangentes de perda elétrica e magnética, respectivamente. Desta forma, obteve-se a distribuição da tangente de perdas elétrica e magnética, apresentadas na Figura 27.

Figura 27 – Gráfico da distribuição das tangentes de perdas: A) Tangente de perda elétrica das amostras. B) Tangente de perda magnética das amostras.



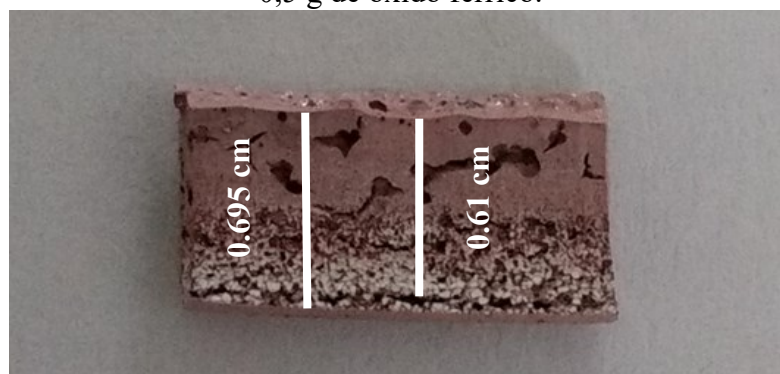
Fonte: Autor (2017).

Os gráficos da Figura 27 demonstram o principal centro absorvedor presente nos materiais estudados. De acordo com a figura é possível observar que a tangente de perda que torna-se mais expressiva é a do tipo elétrica, portanto, o dióxido de titânio de fase anatase, apresenta as melhores características absorvedoras. Como o principal centro absorvedor é o dióxido de titânio, temos que a absorção é devido aos mecanismos de perda no campo elétrico, isso é denotado no gráfico da Figura 27.

Na Figura 27(B), é possível observar que apenas uma amostra, especificamente a Amostra 1 (2,00g TiO_2 e 0,50g Fe_2O_3) apresenta altos níveis de atenuação relacionados ao caráter magnético do material, algo que não é facilmente explicado, olhando a composição do mesmo. Mas observa-se também que essa perda é pontual, sendo dada especificamente para a frequência de 12,27 GHz.

Na seção 2.2.1 discutiu-se sobre o fenômeno do cancelamento das fases das ondas, que é dado em faixas muito estreitas de frequência. Buscou-se verificar se este fenômeno ocorria no material em questão. De acordo com a Figura 3, esse tipo de absorção se apresenta quando 25% do comprimento de onda incidente é o tamanho da amostra, e quando sua impedância é próxima da de 377Ω (COHN; DALY e PARKER, 1995). Esse não é o caso, pois o tamanho da amostra é de 0,695 cm e 25% do comprimento de onda na frequência de pico de 12,27 GHz é 0,61 cm (YOUNG; FREEDMAN, 2008). Então, de forma a investigar a estrutura interna do corpo de prova, realizou-se um corte lateral na Amostra 1, como apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Corte lateral realizado na Amostra 1, que possuía 2,0 g de dióxido de titânio e 0,5 g de óxido férrico.



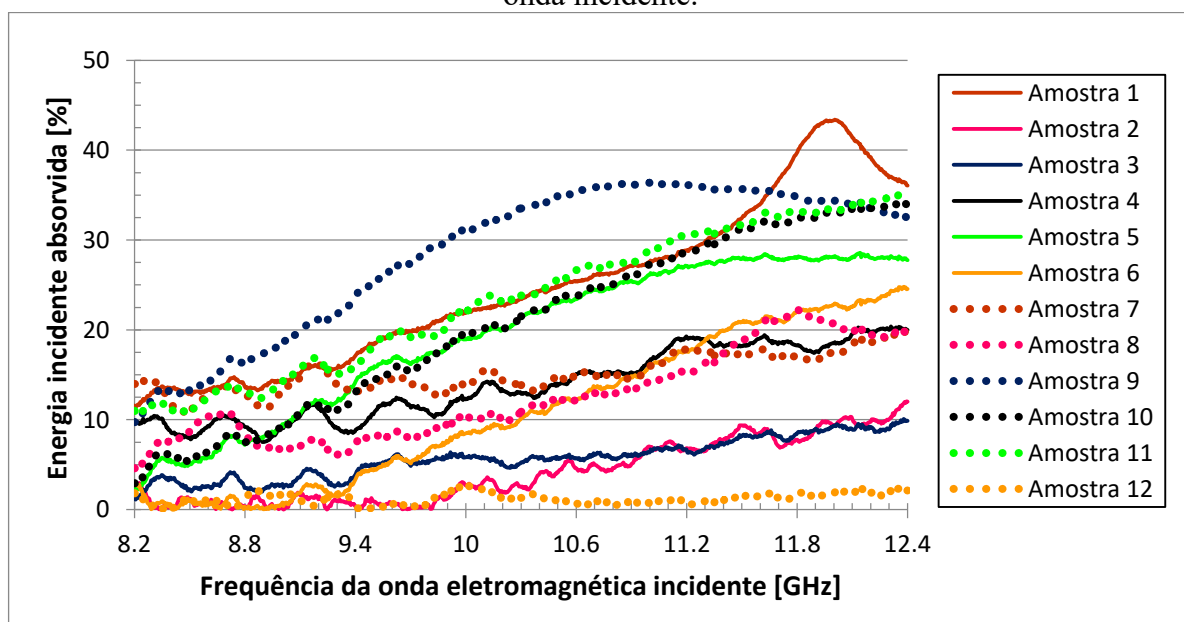
Fonte: Autor (2017).

É possível perceber que a amostra apresenta uma série de descontinuidades na resina, que a torna similar a uma Estrutura de Salisbury, descrita na seção 2.2.1. Esses vazios estão dispostos a 0,61cm do topo da amostra, como demonstrado na Figura 28 e pode auxiliar o entendimento de tal fenômeno. Em meio a esse vazio, é possível observar a presença de óxido férrico, que possui características magnéticas de absorção, sendo essa, a possível causa do pico apresentado na Figura 27(B).

4.4. AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NAS AMOSTRAS

É possível avaliar a atenuação da radiação eletromagnética por meio de um analisador de espectro vetorial acoplado a um guia de onda, como citado na seção 3.2.4. Esses resultados podem ser dados em termos de decibéis ou em termos de porcentagem. Para melhor visualização, foi utilizada a escala em porcentagem de absorção. Os resultados podem ser visualizados na Figura 29, que apresenta a atenuação de todas as 12 amostras produzidas, avaliadas no intervalo de frequências de 8,2 GHz até 12,4 GHz.

Figura 29 – Distribuição da atenuação de energia nos compósitos, em relação a frequência de onda incidente.



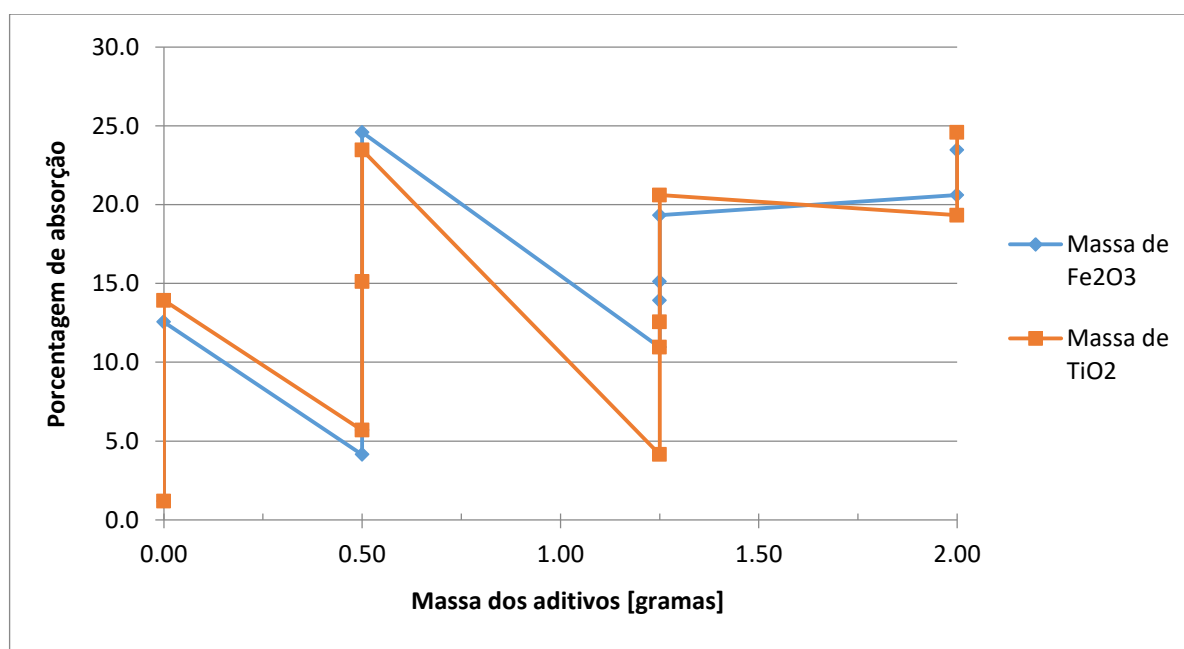
Fonte: Autor (2017).

Analisando o gráfico da Figura 29 é possível observar que o compósito que possui a maior atenuação (43,4%) é o relativo à Amostra 1 (2,00g TiO_2 e 0,50g Fe_2O_3). Este comportamento deve, possivelmente aos espaços vazios presentes na amostra. Este tipo de absorção condiz com aquele apresentado pelas estruturas de Salisbury, de caráter do tipo *Narrow* (N), que tem grande absorção em uma banda curta de frequência (COHN; DALY e PARKER, 1995).

Analisando as outras amostras, nota-se que todas as onze amostras possuem caráter do tipo *Wide* (W), com absorções acima de 10% para a maioria das composições. Percebe-se também que todas tem uma absorção crescente em relação à faixa de frequências examinadas, isso acontece, pois, quanto maior a frequência analisada, menor é seu comprimento de onda (YOUNG; FREEDMAN, 2008). Esse menor comprimento de onda é capaz de penetrar melhor no material, tendo assim maior contato com os aditivos, ampliando a absorção.

Devido ao caráter de absorção em banda larga, decidiu-se relacionar a absorção média das amostras com a massa de aditivos, de forma a investigar a interação de cada aditivo com a absorção total apresentada pelo composto, sendo que esses dados são apresentados na Figura 30.

Figura 30 – Distribuição da atenuação de energia média nos compósitos, de acordo com a massa de aditivos presente.



Fonte: Autor (2017).

Analisando a Figura 30 verifica-se que, de forma geral, uma proporção maior de aditivos, resulta em uma maior absorção, excluindo-se a análise da Amostra 1, que apresenta um fenômeno físico de absorção. No caso da Amostra 9 (2,00g TiO_2 e 2,00g Fe_2O_3), verifica-se que a mesma apresenta uma absorção máxima de 36%, sendo a maior presente, ao analisar apenas fenômenos químicos de absorção. Percebe-se que as amostras que possuíam as mesmas proporções em massa, em relação a cada aditivo, como as Amostras 1 (2,00g TiO_2 e 0,50g Fe_2O_3) e 11 (0,50g TiO_2 e 2,00g Fe_2O_3), tem distribuições de absorção semelhantes, mas em todos os casos, uma maior concentração de hematita levou a uma maior absorção. Considerando este exemplo, pode-se observar uma maior absorção na Amostra 11, desconsiderando o pico da amostra 1, que é dado devido a um fenômeno físico de cancelamento de fases da onda incidente e refletida.

Por outro lado, verifica-se que as amostras 10 (1,25g TiO_2 e 2,00g Fe_2O_3) e 5 (2,00g TiO_2 e 1,25g Fe_2O_3), foram as que obtiveram uma maior absorção, seguidas pelas amostras 7, 4, 6, 8, 3 e 2. A amostra 12 não apresenta nenhuma absorção significativa, por ser a amostra de referência, apenas utilizando a resina alquídica, sem qualquer aditivo.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou avaliar a efetividade de um compósito de matriz alquídica, aditivado com particulados de óxido férrico, de fase hematita e dióxido de titânio de fase anatase quanto à capacidade de absorção da radiação eletromagnética emitida por radares, dentro do espectro de frequência de 8,2 a 12,4 GHz.

Para a obtenção dos compósitos, utilizou-se uma matriz alquídica, frequentemente empregada no setor aeroespacial como vernizes e primers. Esse compósito foi manufaturado de modo a possibilitar verificar a relação da absorção eletromagnética com a proporção de cada aditivo ou com a disposição dos mesmos nas amostras.

Os compósitos obtidos no estudo foram avaliados quanto ao seu nível de absorção eletromagnética e quanto as suas propriedades elétricas, magnéticas e morfológicas, através de ensaios de guia de onda e microscopia eletrônica de varredura.

A análise de difração de raios-X permitiu identificar os aditivos, confirmando a natureza química de cada um. Desta forma, certificou-se que os aditivos se tratavam de dióxido de titânio, de fase anatase e o óxido férrico, de fase hematita.

Com a análise de MEV foi possível avaliar a distribuição das partículas na matriz polimérica. Verificou-se que, durante o processo de cura, os aditivos decantaram e formaram diversas fases de acordo com seu peso atômico. De acordo com as análises, pode-se observar que o dióxido de titânio apresentou baixa interação com a matriz, segregando na amostra.

Essa característica de separação de fases, principalmente do dióxido de titânio, permitiu que a análise de características elétricas do material fosse bastante evidenciada, mecanismo observado pelo autor, mas que deve ser melhor estudado. Observou-se que, para as amostras preparadas neste trabalho, o mecanismo de absorção se dava justamente pelos aditivos dielétricos, que formaram uma fase bem definida em cada compósito.

Os resultados de absorção eletromagnética sugerem que quanto maior a porcentagem de aditivos, quando combinados em iguais massas, maior a atenuação da radiação incidente, alcançando valores de 36% de absorção para o compósito com 2,00g TiO_2 e 2,00g Fe_2O_3 . As amostras, em geral, apresentaram um caráter de banda larga de absorção, do tipo *Wide*, ou

seja, não apresentam picos de absorção em frequências específicas. Outra propriedade que é de grande importância, é o aumento da absorção a medida que o comprimento de onda fica menor, essa propriedade não descaracteriza a absorção do tipo *Wide*, por ser gradual, e não pontual.

O maior índice de absorção eletromagnética foi observado na amostra com 2,00g de TiO_2 e 0,50g de Fe_2O_3 , que apresentou espaços vazios distribuídos em sua estrutura, característico de absorvedores do tipo Salisbury, com espessura efetiva de cerca de $\lambda/4$, da onda incidente. Não foram encontradas na literatura hipóteses que expliquem a dificuldade de homogeneizar os compostos com dióxido de titânio. Entretanto, os resultados sugerem que esta dificuldade deve-se à forças intermoleculares capazes de uni-los em uma única fase.

Julgando os resultados e análises efetuadas pelo presente trabalho, conclui-se que ao aplicar aditivos em uma matriz alquídicica é possível a obtenção de um material absorvedor de radiação eletromagnética de banda larga na faixa de frequências de 8 a 12 GHz. De acordo com os resultados, pode-se intuir que, para maiores frequências, haveria um aumento na absorção apresentadas pelos compósitos estudados. Esse espectro de altas frequências é empregado para blindagem eletromagnética de equipamentos utilizados no setor de telecomunicações, principalmente, para redução de ruídos no sinal em determinados níveis de frequência.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse presente trabalho, os resultados alcançados são preliminares, apesar de reforçarem conceitos e proporcionarem uma nova percepção relacionada à capacidade de atenuação de compósitos de matrizes alquídicicas. Portanto, é necessário que um estudo mais aprofundado seja realizado, de modo a compreender em sua totalidade os fenômenos físicos envolvidos no processo de atenuação da radiação eletromagnética nesse tipo de estrutura, mapeando todas as possíveis formas de absorção existentes no material e maximizá-las a ponto de tornar esse material um excelente absorvedor. Assim, podem-se sugerir como temas de trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Realizar um estudo quanto a morfologia do compósito, de forma a investigar a absorção em materiais com diferentes padrões geométricos e formas de homogeneização;

- Estudar com maior profundidade os mecanismos físicos e químicos que regem o caráter absorvedor do compósito;
- Avaliar diferentes materiais aditivados, mas com características dielétricas e magnéticas;
- Analisar a influência da técnica de mistura das amostras de forma a produzir um compósito mais homogêneo ou, por outro lado, subdividir os compósitos em multicamadas compostas de diferentes fases;
- Caracterizar o compósito em relação a sua absorção, pelo uso de diferentes técnicas, via arco NRL e câmara anecóica;
- Avaliar a influência dos aditivos nas propriedades mecânicas.

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.
- BRASIL. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Ministério da Ciência e Tecnologia (Org.). **Materiais Avançados**: 2010. Brasília: Ciência, Tecnologia e Inovação, 2010. 360 p.
- CHO, W. **Structural evolution and characterization of BaTiO₃ nanoparticles synthesized from polymeric precursor**. J. Phys. Chem. Solids, vol. 59. p. 659-666. 1998.
- CLEGG, W. **Comprehensive Coordination Chemistry II**. “2.4 - X-ray Diffraction”. Pergamon, Oxford, Pages 57-64, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080437486011154>. Acesso em: 21 Out. 2017.
- COHN, Z., DALY, J. PARKER, C. **Advanced Ferrite Materials for Anechoic Chambers**. Ceramic Transactions, vol. 47, p. 269 – 284, 1995.
- COMPTON, A. H.; ALLISON, S. K., **X-Ray in Theory and Experiment**; D. Van Nostrand Company, Inc. 1967.
- DEDAVID, B. A. GOMES, C. I. & MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EDIPUCRS, Porto Alegre (2007).
- DIAS, J. C. SILVA, F.S. REZENDE, M.C. **Absorvedores de radiação eletromagnética aplicados no setor aeronáutico**. Revista Ciência & Tecnologia, v. 15, p. 33-42. 2000.
- DIAS, J. C. **Obtenção de Revestimentos Absorvedores de Radiação Eletromagnética (2-18 GHz) Aplicados no Setor Aeronáutico**. 2000. 137 p. Ph.D. Thesis – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP. 2000.

ESCH, T.R. GADACZEK, I. BREDOW, T. **Surface structures and thermodynamics of low-index of rutile, brookite and anatase – a comparative DFT study.** Applied Surface Science. Vol. 288. p. 275-287. 2014.

FAEZ, R. et al. **Polímeros condutores para blindagem eletromagnética.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.10, nº 3, p. 134, 2000.

FREIRE, V. M. SOETHE, V. L. DELATORRE, R. G. PARUCKER, M. L. **Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética, Baseados em um Compósito Híbrido de Fibra de Vidro.** X FOCIEST. 2016. Disponível em: < http://lats.paginas.ufsc.br/files/2016/09/VMFreire_FOCIEST.pdf>. Acesso em: 26 Set. 2017.

GAMA, A. M. GONÇALVES, J. M. R. P. REZENDE, M. C. CARDOSO, A. M. **Estudo do efeito de aditivos magnético/dielétrico no comportamento de borrachas absorvedoras de microondas.** Congresso Brasileiro de Polímeros, 2007, Campina Grande - PB. 9º Congresso Brasileiro de Polimeros - 9CBPol/2007, v. 1, p. 1-8, 2007.

GONÇALVES, V. F. M. **Materiais Compósitos Estruturais Atenuadores de Radiação Eletromagnética (8,2-12,4 Ghz).** 2016. 72 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade de Taubaté, UNITAU, Taubaté, SP. 2016.

GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics.** 3rd Edition. New Jersey: Prentice-Hall, 1999, 576 p.

HALLIDAY, D. & RESNICK, R. Física, v. 4, **Eletricidade e Magnetismo**, Trad. de Antonio Máximo R. Luz, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1984.

HAKKI, B. W., COLEMAN, P. D. **A dielectric resonator method os measuring inductive capacities in the millimeter range.** IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. P. 402-410, 1960.

HOSCH, W. L. Encyclopaedia Britannica, 2th ed., s.v. **Alkyd resin.** Chicago: Encyclopaedia Britannica, 2016. Disponível em: < <https://www.britannica.com/science/alkyd-resin>>. Acesso em: 21 Out. 2017.

INTERNATIONAL ENCYCLOPAEDIA OF COMPOSITES, v. 6, **VHC Publishers**, New York, 1991.

KOSTIKOV, V.I. **Fibre Science and Technology**. [S.l.]: Chapman & Hall, (Soviet Advanced Composites Technology Series). 1995.

KUMAR, A. et al. **Microwave absorbing behavior of metal dispersed TiO₂ nanocomposites**. Elsevier, v. 25, n. 2, p. 483-489. 2013.

LANDMANN, M. RAULS, E. SCHMIDT, W.G. **The electronic structure and optical response of rutile, anatase and brookite TiO₂**. Journal Physics. p. 24, 2012.

LEE, S.W. **Understanding of Surface Reflections in Computer Vision by Color and Multiple Views**. Ph.D. thesis, University of Pennsylvania. 1991.

MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura e microanálise**. 2003. Disponível em <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_Apostila.pdf>, Acesso em: 24 Out. 2017.

MARINHO, C. S. **Caracterização de Materiais Absorvedores de Ondas Eletromagnéticas (MARE) - I**. 2010. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/pdfs/tutorialcaracmat.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2015.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos**. São Paulo: Artiber, 2011.

MEGSON, T. H. G. **Aircraft Structures for engineering students**. 5. ed. USA: Butterworth-Heinemann, 2013.

MOUDGIL, H. K. **Textbook of Physical Chemistry**. Connaught Circus, New Delhi-1: Prentice Hall India Learning Pvt, Limited, 2010.

NANVAEE, A. A. YAHYA, R. GAN, S. N. **Alkyd Resins are Still of Major Important Binders in Organic Coatings**. Malaysia Polymer International Conference (MPIC 2009). p. 65-69, 2009.

NASSEH, J. *Barcos: Métodos Avançados de Construção em Composites*. Rio de Janeiro, 2007.

NOHARA, E. L. *Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos*. 2003, Ph.D. Thesis – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP. 2003.

NOHARA, E. L. et al. **Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de micro-ondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons CoTi e dopada com La**. Journal of Aerospace Technology and Management. p. 255-263, 2009.

REJAS, P. E. B. Filmes finos metálicos absorvedores de radiação eletromagnética aplicados a tecnologia furtiva. 2014. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

REZENDE, M. C. MARTIN, I. SILVA, F. S. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética**, Spectrum, v.2, p. 17-20, 2000.

SAINI, P.; ARORA, M. **Microwave Absorption and EMI Shielding Behavior of Nanocomposites Based on Intrinsically Conducting Polymers, Graphene and Carbon Nanotubes**. In New Polymers for Special Applications; Gomes, A. D., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia, 2012.

SAVILLE, P. **Review of Radar Absorbing Materials**. Defence Research & Development Atlantic Dartmouth, Canada. 2005.

SIMAS, J. G. S. **Análise da invisibilidade a radar de filmes finos metálicos depositados sobre fibra de vidro para aplicação na indústria naval**. 2016. 80f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

SIMÕES, R. *Materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8 a 12 GHz*. 2005. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação), Universidade de Taubaté, UNITAU, Taubaté, SP. 2005.

SINGH, K. OHLANA, A. BAKHSHIA, A.K. DHAWANA, S.K. **Dielectric and magnetic properties of conducting ferromagnetic composite of polyaniline with Fe₂O₃ nanoparticles**. Elsevier, v. 212, n. 2, p. 651-658. 2008.

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 - 12 GHz). **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, [s.l], v. 27, n. 2, p.63-67, jun. 2008.

SOETHE, V. L. *Filmes Finos Absorvedores de Microondas obtidos pelo processo de Deposição Física em fase vapor*, 2009. Tese (Doutorado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP. 2009.

WILLIAMS, R. C. Advances in alkyd resins, **Applied Polymer Science: 21st Century**, p. 471-481, 2000.

WYPYCH, G. **Handbook of Polymers**. “AK alkyd resin” Elsevier, 2012. p. 11-13. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781895198478500059>>. Acesso em: 21 Out. 2017.

YANG, Z. LUO, F. HU, Y. DUAN, S. ZHU, D. ZHOU, W. Dielectric and microwave absorption properties of TiO₂/Al₂O₃ coatings and improved microwave absorption by FSS incorporation. **Journal of Alloys and Compounds**. v. 678, p. 527-532. 2016.

YOUNG, H. D. FREEDMAN, R. A. **FISICA IV - ÓTICA E FÍSICA MODERNA**, 12a ed. São Paulo, Addison Wesley, 2008.

ZHONG, B. WANG, C. YU, Y. XIA, L. WEN, G. **Facile fabrication of carbon microspheres decorated with B(OH)₃ and α -Fe₂O₃ nanoparticles: superior microwave absorption**. Journal Colloid Interface Science. Vol. 505, p. 402-409, 2017.

ZHOU, J. HE, J. WANG, T. LI, G. GUO, Y. ZHAO, J. MA. Y. **Design of mesostructured γ -Fe₂O₃/carbon nanocomposites for electromagnetic wave absorption applications**. Journal of Alloys and Compounds. Vol. 509, p. 8211-8214, 2011.