

# CATEGORIA 1

## MELHOR MONOGRAFIA



2º *Lugar*

**O56M**

**VITOR FERNANDO DE MELO GONÇALVES**

46 *Anos*

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP

Materiais Compósitos Estruturais  
Atenuadores de Radiação  
Eletromagnética (8,2-12,4 GHz)

**Prêmio de Desenvolvimento e Inovação da Aviação Civil**

**Categoria: Monografia**

**Tema: Novas Tecnologias na Aviação Civil**

**MATERIAIS COMPÓSITOS ESTRUTURAIS ATENUADORES DE RADIAÇÃO  
ELETROMAGNÉTICA (8,2-12,4 GHz)**

**2016**

## RESUMO

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética estruturais, também conhecidos como *Radar Absorbing Structures* (RAS), combinam alta resistência mecânica com absorção da energia da onda eletromagnética e compatibilidade eletromagnética. São obtidos usualmente pela combinação de compósitos estruturais baseados em fibras contínuas de carbono, vidro e aramida em uma matriz polimérica, ou estruturas sanduíche constituídas por colmeias ou espumas, com materiais absorvedores de radiação eletromagnética. O objetivo do presente trabalho foi realizar um estudo da obtenção, caracterização eletromagnética e óptica de compósitos estruturais atenuadores de radiação eletromagnética, na faixa de frequências compreendidas entre 8,2-12,4 GHz, obtidos pela combinação de compósitos avançados, baseados em tecido de fibras contínuas de vidro e carbono com matriz termorrígida tipo epóxi, com configuração de trama 4HS, e filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética baseados em um substrato de poli(tereftalato etileno), com deposição de uma camada de cobre. Os compósitos foram obtidos em três tipos de configurações, sendo cada uma com diferentes quantidades de camadas de tecido de fibra de vidro, fibra carbono e filme fino absorvedor de radiação eletromagnética. Para cada configuração foram processados cinco compósitos: um compósito somente com o substrato polimérico PET sem a deposição da camada de cobre, denominado branco, e outros quatro compósitos, cada um com o substrato polimérico de PET depositado com uma camada de cobre, nas espessuras de 5nm, 10nm, 15 nm e 20 nm, totalizando assim, quinze tipos de compósito. A microscopia óptica dos compósitos obtidos mostra uma boa consolidação do filme fino absorvedor de radiação eletromagnética entre as

camadas de tecido de fibras de vidro e a matriz polimérica. Todos os compósitos obtidos apresentam níveis de atenuação da energia da onda eletromagnética, entre -0,1 dB até -11 dB, sendo que o comportamento da resposta de atenuação mostra predominantemente um caráter ressonante, típico de material que exhibe cancelamento das ondas eletromagnéticas por interferência destrutiva permitindo a minimização do problema de radiação ou captação de ruídos eletromagnéticos externos. O uso deste material, permite uma maior durabilidade dos equipamentos além de permitir a “não poluição” do ambiente eletromagnético, possibilitando, assim, uma compatibilidade magnética entre equipamentos eletrônicos em determinadas faixas de frequências e seu uso tanto na aviação civil quanto na militar, além da possibilidade de utilização em outros ramos importantes da sociedade, como por exemplo na telefonia celular.

**Palavras-chave:** MARE, filmes finos, compatibilidade eletromagnética.

## SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO .....	5
I.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	5
I.2 - OBJETIVOS.....	7
I.2.1 - Geral .....	7
I.2.2 - Específicos.....	7
II – DESENVOLVIMENTO.....	8
II.1 – BASE TEÓRICA.....	8
II.1.1 – Utilizações Gerais de Materiais Avançados .....	8
II.1.2 – Compatibilidade Eletromagnética (EMC) .....	13
II.1.3 - Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética .....	16
II.1.4 - Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria .....	25
II.1.5- Processo Atenuação Energia da Onda Eletromagnética por Filmes Finos.	30
II.2 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	35
III.2.1 – Materiais e Equipamentos.....	36
III.2.2 Condições Obtenção dos Filmes Finos Absorvedores de Radiação Eletromagnética .....	37
III.2.3 – Caracterização Eletromagnética .....	38
III.2.4 – Microscopia Óptica.....	38
III.2.5 – Metodologia Para Processamento dos Compósitos.....	39
III.3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	44
III.3.1 Microscopia óptica dos compósitos obtidos .....	45
III.3.2 Caracterização eletromagnética dos compósitos obtidos .....	47
III - CONCLUSÕES .....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58

## **I. INTRODUÇÃO**

### **I.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Materiais sempre marcaram as etapas de evolução dos povos e das nações. A história da humanidade tem como marcos temporais nomes de materiais, pois os recursos naturais, já não eram suficientes como vantagem competitiva entre as primeiras aglomerações, com isto, buscavam nos materiais as fontes para novos utensílios e equipamentos militares como forma de supremacia perante seus adversários. Hoje, a sociedade moderna, também tem como diferencial competitivo o conhecimento tecnológico em diversas áreas, entre estas áreas destaca-se a área de materiais como uma das mais proeminentes formas de supremacia e autonomia política.

A realização de estudos prospectivos sobre materiais é uma prática frequente em vários países, como parte da estratégia de definição de políticas de financiamento apropriadas para seu desenvolvimento científico e tecnológico. Nas últimas décadas, a área de materiais sofreu um avanço significativo, destaca-se a evolução que tiveram os compósitos avançados, iniciando na segunda guerra mundial e acelerando com a corrida espacial, onde vários novos compósitos, como as fibras de carbono, foram desenvolvidos para uma aplicação específica revertendo em ampla inovação em produtos e processos na vida e atividades civis.

O presente trabalho apresenta um novo conceito de material compósito, processado através de materiais comumente utilizados em compósitos gerais, justapostos com filmes finos com depósito de substrato polimérico sobre este filme fino.

A motivação surgiu da possível empregabilidade deste material em compatibilidade eletromagnética com uso na aviação civil e emprego em

equipamentos na área de telecomunicações. Também poderá ser utilizado em equipamentos militares com objetivo de baixa detecção ao radar.

Através de pesquisas prévias, verificamos a escassez de publicações de materiais com estas características, principalmente por sua utilização militar. Portanto, torna este trabalho, uma publicação relativamente inédita.

## **I.2 - OBJETIVOS**

### **I.2.1 - Geral**

O objetivo do presente trabalho é realizar um estudo da obtenção, caracterização eletromagnética e óptica de compósitos estruturais absorvedores de radiação eletromagnética, na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz.

### **I.2.2 - Específicos**

Os objetivos específicos envolvem:

- Obtenção de filme fino absorvedor de radiação eletromagnética do elemento químico cobre (Cu) com espessuras de 5, 10, 15 e 20 nm, depositados em substrato polimérico do politereftalato de etileno (PET).
- Fabricação do compósito estrutural absorvedor de radiação eletromagnética, obtido pela laminação do filme fino absorvedor intercalado com tecidos pré-impregnados de fibra de vidro e carbono em três configurações diferentes (com variações nas quantidades de filmes finos e tecidos *prepreg*), consolidados em autoclave.
- Caracterização eletromagnética dos compósitos obtidos pela técnica de guia de onda, na faixa de frequências de 8,2 a 12,4GHz, e caracterização da seção transversal do compósito via microscopia óptica.

## II – DESENVOLVIMENTO

### II.1 – BASE TEÓRICA

#### II.1.1 – Utilizações Gerais de Materiais Avançados

Entre as principais aplicações de materiais avançados, destacam-se as seguintes áreas de aplicação: aviação civil, magnética, eletrônica, fotônica, energia, defesa, segurança pública, indústria de construção civil, atividades espaciais, meio ambiente, recursos naturais minerais e biológicos, saúde, médico-odontológico e tribologia com o desenvolvimento de materiais com melhores acabamentos superficiais e filmes interfaciais (CGEE, 2010). Na área de atividade aeronáutica e espacial, o uso de materiais avançados estava inicialmente diretamente relacionado à confecção de foguetes e aeronaves do programa militar americano, como as aeronaves “*stealth*” (Baixa Detecção ao Radar) F-117 e B-2 (Figura 1) (GAMA, 2011).

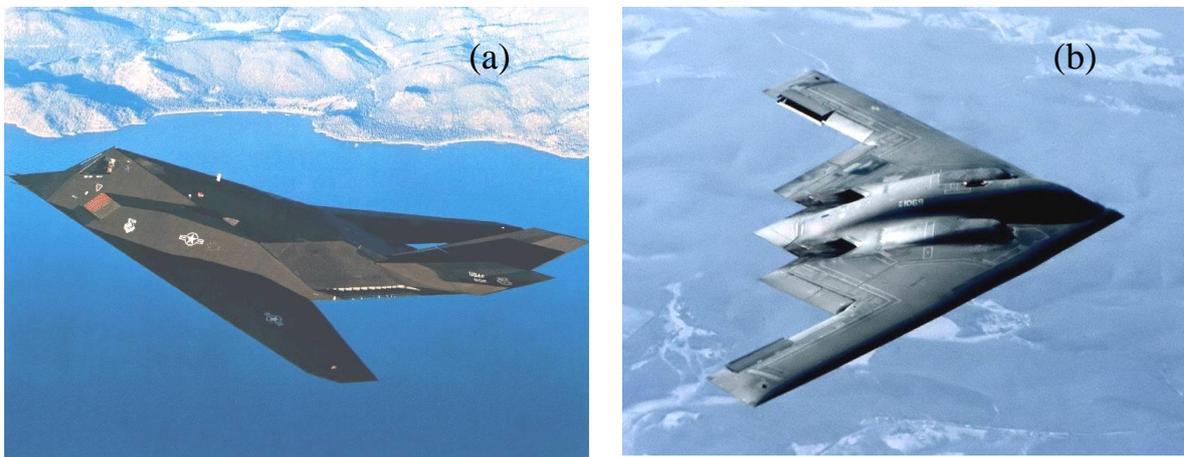


Figura 1 - Aeronaves americanas com baixa detecção ao radar. (a) F-117 e (b) B-2

Atualmente, além do uso militar, empresas montadoras de aeronaves de uso civil, como a Boeing, Bombardier e Embraer, estão trabalhando com compósitos poliméricos em partes estruturais permitindo uma redução de peso de 20 a 30%, além de 25% na redução do custo final de obtenção das peças (RESENDE,

2000), mantendo ou melhorando a resistência ao componente metálico substituído e, principalmente, na manufatura dos *radomes*, local de instalação do radar na parte frontal das aeronaves, possibilitando o seu funcionamento sem interferir na radiação emitidas ou recebida por aquele aparelho (KLEMPERER & MAHARA, 2009).

Na Figura 2 é apresentada uma aeronave modelo Tucano produzida pela Embraer e de uso militar (REZENDE, 2000), com destaque para os componentes fabricados em compósitos com fibras contínuas e matriz termorrígida.

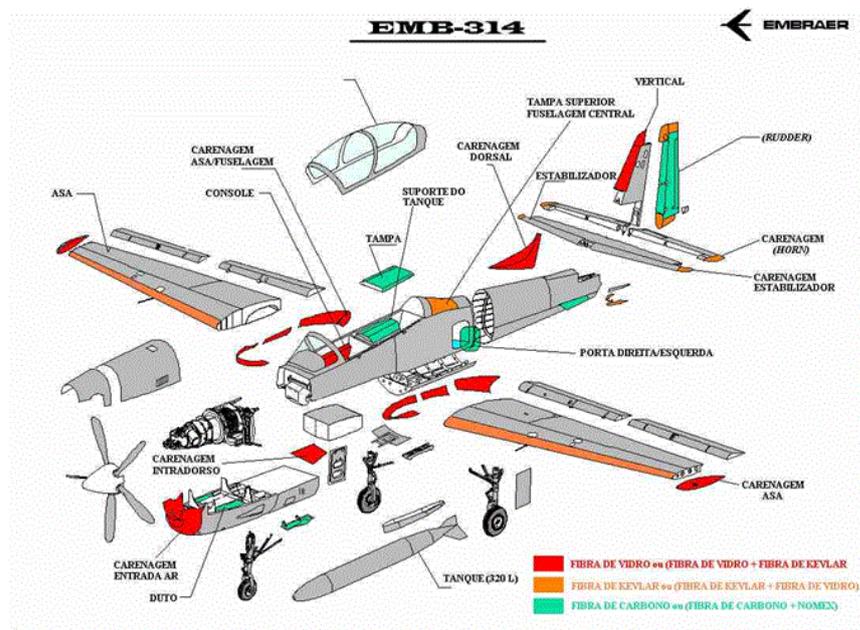


Figura 2 - Aeronave modelo Tucano produzida pela Embraer e de uso militar com destaque para os componentes fabricados em compósitos termorrígidos

Destaca-se, ainda, a aplicação em componentes de grupos motopropulsores, principalmente em tuberias de foguetes impulsionados à base de componentes sólidos e na área de exaustão das turbinas aeronáuticas civis e militares, além da proteção térmica em veículos de reentrada na atmosfera, sensoriamento e controle dos sistemas de voo.

Na Figura 3, pode-se verificar um esquema de uma garganta da tubeira de foguete, utilizada pelo Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial - DCTA no seu Veículo Lançador de Satélite (VLS), fabricada em material compósito (REZENDE, 2000).

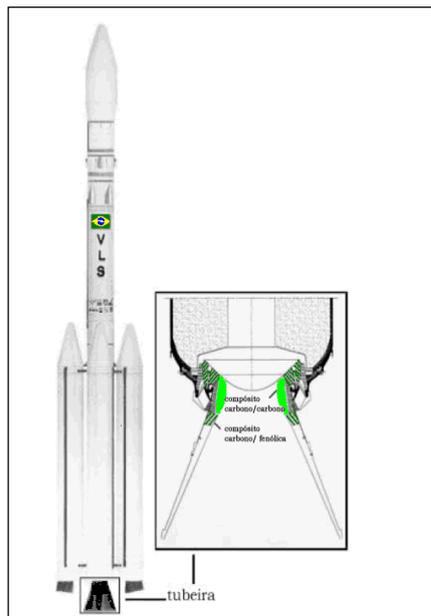


Figura 3 - Esquema de uma garganta da tubeira de foguete em compósito carbono/carbono (garganta) e carbono/fenólica (tubeira).

No futuro, a tendência de crescimento de uso de 5% ao ano de compósitos poliméricos estruturais (REZENDE, 2000) projetados no início do século XXI, será mantido ou incrementado. Em 2013, o setor brasileiro de compósitos teve um crescimento de 8,9%, já em 2014, o crescimento inicial estimado de 11,5%, fechou perto de 5,1%, isto em virtude da crise que afeta o país (ALMACO, 2015). Este crescimento é devido, principalmente, à utilização cada vez maior dos compósitos poliméricos na indústria automotiva, principalmente na fabricação de peças e componentes e na montagem final dos automóveis, e, também, devido à tendência

de queda dos preços destes compósitos. Cabe destaque ao uso crescente no mercado de energia eólica, agrícola e construção civil (ALMACO, 2015).

Em âmbito global, o mercado de compósitos teve um crescimento de 9,5% em 2012 e uma expectativa de taxa média anual de crescimento de 7% no período compreendido entre 2013 até 2018 (COMPOSITES WORLD, 2014).

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) são assim denominados por possuírem propriedades que lhes permitem troca de energia da radiação eletromagnética incidente pela energia térmica, promovida pela vibração das moléculas e pela inversão de spin (PEREIRA, 2007). Dentre os materiais utilizados como absorvedores destacam-se materiais compósitos consistindo em epóxi de resina e pó de carbono (MICHELI, 2011), alumínio (KLEMPERER, 2009) o negro de fumo, ferrocarbonila e as ferritas (LEE, 1991 apud PEREIRA, 2007).

O MARE é amplamente utilizado na tecnologia furtiva, também denominada “*Stealth*”, empregada para diminuir a assinatura radar de plataformas militares aéreas, terrestres e marítimas, em virtude de suas características de absorção do sinal radar incidente (MIACCI, 2012). Um exemplo de plataforma marítima projetada com baixa detecção ao radar é mostrado na Figura 4, denominada M-80 *Stilleto*, da marinha dos Estados Unidos (DEFENSE INDUSTRY DAILY, 2014).



Figura 4 - Protótipo Naval *M-80 Stiletto*.

O uso de radiação eletromagnética na faixa de frequência de micro-ondas têm se tornado intenso especialmente na área de telecomunicações, como por exemplo, em telefonia celular, transmissão e recepção em antenas através da proteção eletrônica dos equipamentos contra agressões de ondas eletromagnéticas (KAMCHI, 2013). A pesquisa para o desenvolvimento de eficientes materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) tem sido ampliada visando reduzir os danos causados pela incidência da radiação eletromagnética, na faixa de frequência de micro-ondas, em seres vivos (SOETHE, 2008).

Os materiais compósitos podem ser definidos como a justaposição de dois ou mais materiais diferentes, com propriedades distintas, com o objetivo de formar um novo composto com propriedades superiores, como a resistência mecânica, alta estabilidade térmica, maior resistência a corrosão, menor peso estrutural, menores custos, entre outras (GAMA, 2011). Os materiais compósitos mais utilizados atualmente combinam fibras contínuas de carbono, fibra de vidro e aramida, com matrizes poliméricas termorrígidas ou termoplásticas, aplicados nos setores aeronáutico civil e militar, aeroespacial, esportivo, medicina e automobilístico entre

outros, pois permitem obter altas propriedades mecânicas específicas (REZENDE, 2000). Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética podem ser combinados com materiais compósitos, permitindo obter materiais absorvedores de radiação eletromagnética estruturais, também conhecidos como *Radar Absorbing Structure* (RAS), utilizados em projetos onde exige-se a combinação de absorção da energia da onda eletromagnética e altas propriedades mecânicas, em um único componente (JALALI, 2011; JANG, 2013; WANG, 2011).

## **II.1.2 – Compatibilidade Eletromagnética (EMC)**

A Compatibilidade Eletromagnética pode ser definida, objetivamente, como a capacidade de um equipamento funcionar num determinado ambiente eletromagnético de forma correta e esperada, sem interferir ou perturbar os equipamentos próximos a ele ou sem ser perturbado por esses ou outros equipamentos (IEC 61000-4).

Então, a Compatibilidade refere-se a Interferência Eletromagnética (EMI) e a Susceptibilidade eletromagnética. Espera-se que todos os equipamentos elétricos e eletrônicos não causem interferência nem em outros equipamentos, o que seria capaz de influenciar no funcionamento correto destes, nem em si próprios. Deseja-se, também, que os mesmos não sejam susceptíveis, ou seja, sensíveis, às emissões controladas de outros equipamentos.

### **II.1.2.1 – Compatibilidade Eletromagnética (EMC) em Voos Comerciais**

Durante voos comerciais, é solicitado o desligamento de equipamentos eletrônicos, isso ocorre, particularmente, durante o pouso e a decolagem, que são etapas críticas do voo.

Reconhecendo a necessidade de medidas de proteção de EMC e, ao mesmo tempo, para derrubar as barreiras de protecionismo que havia com relação aos equipamentos que eram vendidos para a União Europeia, a Comissão Europeia adotou em 1989 um diretiva que unificava as leis relacionadas à compatibilidade eletromagnética (também chamadas de diretivas de EMC) dos equipamentos que poderiam ser vendidos na UE. Desde 1996, então, foi estabelecido que todos os fabricantes de equipamentos eletrônicos deveriam respeitar as diretivas eletromagnéticas do *EC Council* - Diretiva 89/336/EEC, criadas por um comitê especialmente formado para esse fim (*CENELEC - European Committee for Electrotechnical Standardization*). Esse comitê utilizou padrões da IEC (*International Electrotechnical Commission*). O Padrão internacional para fins de compatibilidade eletromagnética é o IEC 61000-4 - todas elas foram revisadas em 2004 e esta versão vigora atualmente.

### **II.1.2.2 – Nanotecnologia**

Nanotecnologia refere-se à manipulação, produção de materiais e produtos em escala atômica ou em pequenos grupos de átomos (*BRITANNICA ONLINE ENCYCLOPEDIA*, 2012). A nanotecnologia é um avanço tecnológico em vários campos, considerada emergente e interdisciplinar, envolvendo o desenvolvimento de nanomateriais, que apresentam propriedades físicas e químicas diferentes em relação ao mesmo material em escala micrométrica ou maior (*MILANEZ*, 2011).

A concepção do que seria denominada nanotecnologia, foi citado pela primeira vez pelo físico e Prêmio Nobel Richard Feynman, na noite de 29 de dezembro de 1959, em sua famosa palestra no encontro anual da *American Physical Society*, realizado no Hotel *Hunting-Sheraton*, na cidade de Pasadena, Califórnia, intitulada “*There’s a plenty of room at the bottom*”. Richard Feynman lançou ao final

de sua palestra dois desafios, e ofereceu um prêmio de U\$ 1.000,00 para o primeiro indivíduo que solucionasse os problemas. Um dos desafios envolvia a construção de um pequeno motor, e o segundo desafio envolvia escrever toda a Enciclopédia Britânica na cabeça de um alfinete. O que no início foi motivo de brincadeira foi logo levado a sério e chegou às redações dos principais periódicos da época (SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, 2002).

A nanotecnologia reapareceu, fortemente, do modo como conhecemos atualmente, pelo Dr. Eric Drexler em seu depoimento perante o Comitê do Senado para o Comércio, Ciência e Transporte, Subcomitê para a Ciência e Tecnologia e Espaço, em 26 de junho de 1992 em Washington, EUA. A proposta do Dr. Drexler era produzir objetos a partir de moléculas, manipulando átomos individualmente (SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, 2002). Este pesquisador previa a construção de nanorobôs com a finalidade de revitalização de células do corpo humano pondo fim ao processo de envelhecimento e pondo fim a uma série de doenças de origem genética. Neste período, foi dado à nova tecnologia o nome de Nanotecnologia, derivado de nano, a bilionésima parte do metro.

A chave para entender o poder e o potencial únicos da nanotecnologia é que, em nanoescala (dimensão compreendida entre 1 e 100 nanômetros), as propriedades dos materiais podem mudar drasticamente - essas mudanças surpreendentes são denominados efeitos quânticos (ETC GROUP, 2005). Como exemplo de tais mudanças características, pode-se citar o carbono que na forma de grafite (como o do lápis) é macio e maleável; em nanoescala, na forma de nanotubos, pode ser mais resistente do que o aço e seis vezes mais leve. O óxido de titânio em macroescala é um pó branco, em nano escalas se torna transparente. O alumínio em nanoescala pode entrar em combustão espontânea e por esse

motivo é utilizado como combustível em motor foguete (NOVAS TECNOLOGIAS, 2009).

A matéria prima para a nanotecnologia são os elementos químicos da tabela periódica, elementos conhecidos, todos os elementos da tabela podem ser trabalhados em escala nanométrica. A aplicação desta tecnologia, em estudo em diversos países e instituições, está tornando-se o grande diferencial tecnológico entre as nações e organizações industriais. Esta tecnologia poderá produzir computadores mais velozes, drogas para células específicas, novos catalisadores químicos, bem como a fabricação de materiais mais resistentes, mais leves, mais inteligentes, mais duráveis, etc. As tecnologias em nanoescala estão prontas para se tornarem a plataforma estratégica para o controle global da indústria, alimentação, agricultura e saúde nos próximos anos (ETC GROUP, 2005).

### **II.1.3 - Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética**

Dentre os materiais capazes de atenuar a energia da onda eletromagnética incidente pode-se citar: ferritas (óxidos cerâmicos), negro de fumo, polímeros condutores e filmes finos. Esses materiais diferem quanto aos mecanismos internos de transformação de energia, porém, basicamente, todo material absorvedor de radiação eletromagnética (MARE), transforma a energia da onda incidente em calor. De maneira simplificada, pode-se considerar que esses materiais possuem a capacidade de atenuar a intensidade da onda eletromagnética por meio de mecanismos próprios de perdas (KIM, 2007); (CHUNG, 2003). Materiais que interagem com o campo magnético da onda eletromagnética são chamados de materiais absorvedores de perdas magnéticas, como é o caso dos baseados em ferritas. Por outro lado, materiais que interagem com o campo elétrico da onda eletromagnética são conhecidos como de perdas dielétricas, dentre os quais se

podem citar aqueles obtidos pelo uso de partículas de materiais carbonosos, por exemplo, negro de fumo, polímeros condutores e filmes finos.

Basicamente, os MAREs baseados em centros absorvedores de perdas dielétricas apresentam pequenos valores de permissividade real ( $\epsilon'$ ) e exibem altas perdas ( $\epsilon''$ ), devido à interação da onda eletromagnética incidente com os elétrons presentes na estrutura do material. Por outro lado, os MAREs baseados em centros absorvedores magnéticos apresentam valores acima de 1 tanto para a componente elétrica ( $\epsilon$ ) como para a magnética ( $\mu$ ), ou seja, possuem perdas tanto magnéticas, devido à interação do campo magnético da onda com os spins, quanto dielétricas, devido à interação da componente elétrica da onda eletromagnética com os dipolos elétricos presentes na estrutura desses materiais.

Uma vantagem no uso de materiais absorvedores com perdas magnéticas é a sua reduzida dimensão, de poucos milímetros, se comparado com os MARE dielétricos convencionais, como por exemplo, à base de negro de fumo (NIE, 2007), (PETROV, 2001), (FANG, 2007). No caso desses materiais, é necessário que o mesmo apresente espessuras da ordem centímetros para uma atenuação de aproximadamente 50% (R & F PRODUCTS, 2014), (SAAB BARRACUDA, 2014), (KV MICROWAVE MATERIALS, 2014) e (EMMERSON & CUMMING, 2014). Entretanto, no caso de filmes finos, devido aos processos quânticos de interação da onda eletromagnética incidente com a estrutura eletrônica do material do filme, têm se verificado que para que processos de atenuação ocorram, é necessário que a espessura do recobrimento seja da ordem de nanômetros (BHAT, 1998).

Destaca-se, entre as aplicações civis e militares dos materiais absorvedores, os materiais absorvedores utilizados em blindagem eletromagnética de diversos equipamentos nos setores automobilísticos, aeronáutico civil, militar, bem como na

indústria de componentes e eletroeletrônicos e em sistemas de comunicação sem fio (NIE, 2007), (BREGAR, 2004), (REZENDE, 2000), (LEE, 1991), (JOHNSON, 1986), (EMERSON,1973), (SLEMING, 1998), (HASHSISH,2002). O progresso da engenharia de antenas e blindagens eletromagnéticas em geral, depende fortemente do desenvolvimento destes materiais, em uma larga faixa de frequências, com comprimentos de ondas desde milímetros até metros, devido às diferentes aplicações. O comportamento da atenuação produzida por um material absorvedor é frequentemente classificado como sendo banda estreita ou ressonante, tipo N (*Narrow*) (Figura 5(a)) e banda larga, tipo W (*Wide*) (Figura 5(b)), de acordo com a faixa de frequências atenuada. Absorvedores do tipo N (REZENDE, 2000), com caráter ressonante apresentam o comportamento demonstrado devido aos processos de interferência entre as ondas incidentes e refletidas. Geralmente, são utilizados nos casos onde se deseja atenuar uma faixa de frequência mais estreita, como em processos de eliminação de interferências em dispositivos eletrônicos e na prevenção da reflexão de sinais de TV em parede de edifícios (REZENDE, 2000).

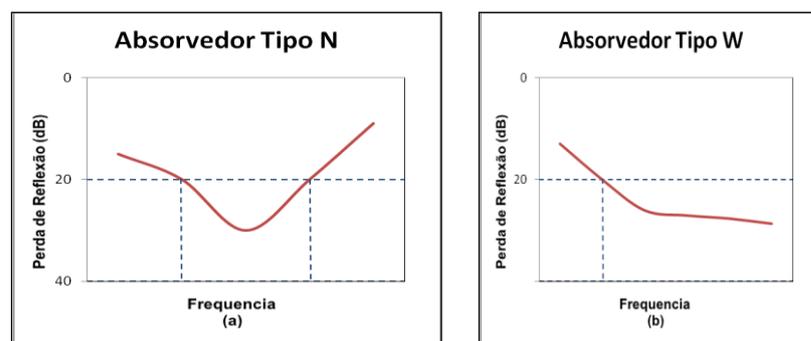


Figura 5 - Curvas típicas de absorção para absorvedores (a) tipo N e (b) tipo W.

Por outro lado, os absorvedores do tipo W apresentam absorção em banda larga de frequências, podendo ser utilizados em inúmeras aplicações, como para o

revestimento de câmeras anecóicas e em artefatos aeroespaciais localizados em seções de radar que operam em uma dada banda, por exemplo, de 8 a 12 GHz (FANG, 2007) e (R & F PRODUCTS, 2014).

Materiais absorvedores produzidos em laboratório começaram a serem fabricados pouco antes da segunda guerra mundial. Desde então, diversos autores têm relatado processos de obtenção e desenvolvimento destes materiais (REZENDE, 2000).

A literatura, no caso de materiais de cunho estratégico, como é o caso de materiais absorvedores de radiação eletromagnética, é relativamente escassa. Entretanto, para materiais já desenvolvidos e conhecidos, como aqueles que fazem uso de negro de fumo e ferritas, existe literatura que aborda os princípios básicos da atenuação da onda eletromagnética. No entanto, pode-se verificar nesta revisão bibliográfica que pouco se descreve a respeito de materiais absorvedores baseados em filmes finos metálicos.

Filmes finos são somente citados para esta aplicação no desenvolvimento de estruturas onde aparecem em conjunto com camadas de polímeros ou borrachas aditadas. Algumas patentes e publicações citam a utilização de materiais absorvedores multicamadas, com o mesmo princípio dos MARE tipo ressonantes, como exemplo, o Jaumann e o Salisbury, descrevendo mudanças na estrutura e propriedades destas configurações, de forma a aumentar a amplitude da atenuação apresentada pelos filmes finos (ABDELAZIZ, 2008). É bem conhecido que absorvedores multicamadas promovem atenuação em faixa larga de frequências (HILZA, 1990), sendo que os absorvedores mais comuns fazem uso de estruturas com espessuras geralmente na ordem de  $1/4\lambda$  como fora descrito anteriormente. Por exemplo, estruturas com duas camadas, uma com partículas de ferrita mais fina,

com tamanho de partícula da ordem de 0,5 a 1,0 $\mu\text{m}$  na face onde incide a onda e na outra face, em contato com a primeira, mas com partículas maiores, da ordem de 5 a 6  $\mu\text{m}$ , melhoram o desempenho na atenuação de micro-ondas (PAPOULIAS, 1992).

Estruturas envolvendo multicamadas também aparecem com a associação de distintos absorvedores convencionais. Por exemplo, absorvedores do tipo  $1/4\lambda$  com a sobreposição de camadas de absorvedor à base de ferrita e/ou colméias, como camadas intermediárias, apresentam promissores resultados quanto à atenuação da energia da onda eletromagnética na faixa de micro-ondas (WRIGHT, 1977).

Na literatura aplicável, a utilização de filmes finos como absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas é pouco citada. Apenas algumas publicações dizem que filmes finos com espessuras da ordem de nanômetros podem ser utilizados como MARE, porém na maioria dos casos, citam estes materiais como refletores. Atenuações da ordem de 17% para filmes de uma liga de alumínio, cromo e ferro, com espessuras em torno de 100 nm, obtidos por evaporação *flash*, são tomadas como base para o presente trabalho (BHAT, 1998). A espessura do recobrimento é um parâmetro decisivo para a característica refletora ou absorvedora da energia da onda eletromagnética incidente (ORING, 1991).

A literatura também cita que filmes finos formados na superfície de janelas de equipamentos, que fazem uso de radiação na faixa de micro-ondas, provocam superaquecimento. Este comportamento é atribuído ao fato da absorção da radiação por uma fina película metálica, gerando danos ao aparelho utilizado. Neste caso, foi verificado que a presença de contaminantes na superfície da janela de micro-ondas causou o aumento no processo de absorção da energia da radiação. Além disso, filmes de TiN com espessuras da ordem de 5 nm, sob a estruturas de ilhas aumentaram a atenuação apresentada por estes recobrimentos (BOSMAN, 2004).

A utilização de elementos metálicos para a obtenção de materiais absorvedores geralmente está relacionada com a característica condutora apresentada por esses. Como é conhecido, existem dois grandes grupos de materiais absorvedores, aqueles que interagem com o campo elétrico da onda eletromagnética e aqueles que interagem com o campo magnético. Os materiais que usam partículas metálicas em sua estrutura geralmente são tratados considerando o modelamento e as propriedades relativas a materiais com perdas dielétricas.

Basicamente, um MARE com perdas dielétricas é caracterizado pela utilização de partículas, como o negro de fumo, com a característica de formarem dipolos elétricos quando da aplicação de um campo elétrico sobre o mesmo. Esses dipolos se alinham conforme a orientação deste campo armazenam a energia e a transformam, por meio de efeito Joule, em calor, reduzindo o sinal incidente (BALANIS, 1989).

Também podemos citar a utilização de elementos metálicos, como alumínio ou materiais dielétricos em formato de esferas, com dimensões da ordem de submicron (centenas de nanômetros), dispersas em uma matriz, na composição de MARE (JANOS, 1994). Outros materiais metálicos, como ligas de níquel cromo, também apresentam interessantes características ópticas e elétricas, evidenciando alterações no valor da resistividade, devido ao espalhamento dos elétrons que sofrem transição em diferentes estados atômicos (SILVA, 2002). Esse comportamento associado ao fato desses materiais apresentarem orientação direcional, os qualifica como candidatos ao processamento de MARE (BALANIS, 1989), juntamente com outros metais como o cobre, bronze, magnésio, ligas de níquel e ferro (*Permalloy*), em forma de multicamadas (PRATT, 1961).

Já, os materiais absorvedores à base de ferrocarbonila e ferritas são considerados de perdas magnéticas. Por exemplo, no caso de ferritas, a absorção (ressonância) é baseada na interação da componente da onda eletromagnética com os *spins* e elétrons da estrutura da ferrita. Neste caso, a energia é perdida em dois mecanismos gerais: rotação dos *spins* e transferência da energia cinética da rotação dos *spins* para a rede cristalina. A componente elétrica da onda interage com os dipolos elétricos presentes na estrutura cristalina da ferrita, por mecanismos de polarização, com um processo semelhante ao descrito para materiais absorvedores com perdas dielétricas (HECK, 1992). Uma maneira de compreender como as ondas eletromagnéticas que incidem sobre um material absorvedor interagem com a matéria, é avaliando o comportamento da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética dos materiais. Por meio desses parâmetros é possível calcular os valores de refletividade de um material, sendo este um ponto vital para o desenvolvimento de um MARE eficiente.

Um material dielétrico se caracteriza por exibir ou poder ser induzido a apresentar uma estrutura de dipolo elétrico, ou seja, existe uma separação das entidades eletricamente carregadas positivas e negativas em nível molecular ou atômico. Essencialmente, um dipolo existirá sempre que houver uma separação entre as cargas positivas e negativas (CALLISTER, 1991). Esta propriedade permite que este tipo de material seja utilizado em capacitores, uma vez que ao interagirem com o campo elétrico são capazes de armazenar energia deste campo (AGILENT TECHNOLOGIES, 2005), (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003). A capacitância ( $C$ ) é uma propriedade dos capacitores que relaciona a capacidade de armazenamento de energia, e é função da constante dielétrica  $k_d$ . Esta constante é composta por uma parte real  $k_d'$ , a qual representa o carregamento do capacitor, e de uma parte

imaginária  $k_d''$ , que está relacionada com a capacidade de dissipação da energia (perda), sendo dada pela Equação (1).

$$k_d = k_d^* = \varepsilon_r = \varepsilon_r^*, \quad (1)$$

onde:

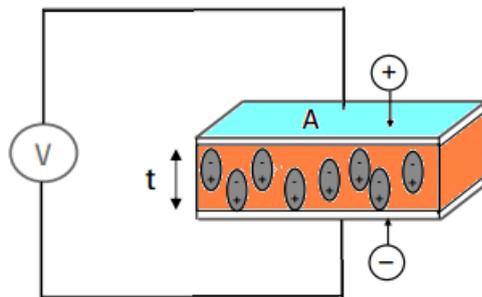
$$\varepsilon = \varepsilon^* = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

$\varepsilon$  é a permissividade absoluta,

$\varepsilon_r$  é a permissividade relativa

$\varepsilon_0$  é a permissividade no espaço livre, sendo  $\varepsilon_0 = 1/36\pi \cdot 10^{-9} \text{F/m}$

A Figura 6 mostra um esquema de um capacitor preenchido por material dielétrico, mostrando a criação dos dipolos (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003).



Onde:

A = Área do Capacitor

V = Voltagem aplicada entre as placas

t = Espessura entre as placas

Figura 6 - Esquema representativo de um capacitor preenchido com material dielétrico polarizado.

A permissividade elétrica é uma grandeza complexa e é dada pela Equação (2). Nesta equação, a constante dielétrica,  $\epsilon_r'$  é a medida da energia do campo externo armazenada no material e  $\epsilon_r''$ , chamada de fator de perda, é a medida da energia do campo elétrico incidente no material dissipada ou perdida. O fator de perda inclui os efeitos de perdas dielétricas e por condutividade (AGILENT TECHNOLOGIES, 2005).

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

$\epsilon_r$  = permissividade elétrica

$\epsilon_r'$  = constante dielétrica

$\epsilon_r''$  = fator de perda

Desta forma, para que um material baseado em perdas dielétricas possa apresentar absorção de energia, é necessário que possua altos valores das componentes  $\epsilon_r'$  e  $\epsilon_r''$ . No caso de materiais metálicos, geralmente o fator de dissipação é bastante acentuado, entretanto o fator de armazenamento irá depender das propriedades do material, tais como espessura, no caso de películas, ou tamanho de partículas, bem como de sua distribuição na matriz (SAVILLE, 2005).

A permeabilidade magnética é uma grandeza que descreve a interação do campo magnético com o material (AGILENT TECHNOLOGIES, 2005) (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003). A permeabilidade, assim como a permissividade, é uma grandeza complexa, sendo que a parte real está relacionada com o armazenamento de energia do campo magnético e a parte imaginária com a dissipação desta energia, sendo dada pela Equação (3) (AGILENT TECHNOLOGIES, 2005).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (3)$$

Onde:

$\mu_0$  = Permeabilidade magnética do vácuo sendo =  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

$\mu_r'$  = Componente real da permeabilidade magnética complexa relativa

$j\mu_r''$  = Componente imaginário da permeabilidade magnética complexa relativa

Alguns materiais, como ferritas, cobalto, níquel e suas ligas apresentam apreciáveis propriedades magnéticas, enquanto que outros materiais não magnéticos possuem sua permeabilidade muito próxima da permeabilidade do espaço livre ( $\mu_r=1$ ). Todos os materiais existentes, por outro lado, apresentam propriedades dielétricas (AGILENT TECHNOLOGIES, 2005) (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003). O tamanho das partículas magnéticas, bem como a sua distribuição em uma matriz, afeta diretamente as propriedades de atenuação da radiação incidente (SAVILLE, 2005). Em materiais onde o valor da permissividade e da permeabilidade são iguais, em ambas as partes real e imaginária, ocorre uma redução quase a zero da energia refletida, entretanto esse perfeito casamento de ambas estas propriedades é bastante difícil de ser encontrado (SAVILLE, 2005).

#### II.1.4 - Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria

Muitos aspectos da propagação da onda eletromagnética em um meio material são dependentes dos valores de permissividade e permeabilidade desse meio (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003). Quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície, essa pode ser refletida, transmitida ou absorvida. Cada um

desses fatores vai depender do tipo de material, composição, espessura e da interação entre a onda e a superfície onde esta está sendo incidida. Uma propriedade importante para verificar a reflexão de uma onda eletromagnética é a impedância.

A impedância ( $Z$ ) é um importante parâmetro para caracterizar circuitos eletrônicos, componentes e os materiais que são utilizados para fazer esses componentes. É geralmente definida como a oposição total que um determinado meio oferece à passagem de uma corrente alternada a uma dada frequência e é representada como uma grandeza complexa, como mostra a Equação (4). É composta de uma parte real, a resistência ( $R$ ) e uma parte imaginária a reatância  $X$  (TIPLER, 1999).

$$Z = R + jX \quad (4)$$

Onde :

$Z$  = impedância,  $R$  = resistência e  $X$  = reatância

Se a impedância da onda no material for diferente daquela do espaço livre ( $Z_0$ ) não haverá casamento de impedância e, portanto, haverá reflexão da onda pelo material (FONTANA, 1998). A impedância do espaço livre é dada pela Equação (5).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \quad (5)$$

Onde:

$Z_0$ =impedância da onda no espaço livre

$\mu_0$ =Permeabilidade magnética do vácuo sendo =  $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

$\epsilon_0$ =Permissividade elétrica do vácuo =  $8,854 \times 10^{-12}$  em F/m

Dependendo da diferença entre as impedâncias do material no qual a onda está incidindo e o ar, uma parte da onda eletromagnética penetra no meio material. Sendo assim, irá viajar neste a uma velocidade menor que a do espaço livre (velocidade da luz  $c=3,0 \cdot 10^8 \text{m/s}$ ). Conseqüentemente, o comprimento da onda dentro do material é inferior àquele apresentado no espaço livre ( $\lambda_0$ ). Após penetrar no material, o mesmo irá sofrer algum tipo de perda, levando a processos de atenuação da energia incidente (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003). Neste caso, a energia incidente no meio é absorvida, reduzindo desta forma o coeficiente de reflexão exponencialmente em função da distância  $x$  (espessura), por um fator  $e^{-\alpha x}$ , onde  $\alpha$  é a constante de atenuação do material, sendo dada pela Equação de atenuação (6)(SAVILLE, 2005).

$$\alpha = -\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \omega (a^2 + b^2)^{\frac{1}{4}} \operatorname{sen} \left( \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( -\frac{a}{b} \right) \right), \quad (6)$$

Onde  $a = (\varepsilon_r' \mu_r' - \varepsilon_r'' \mu_r'')$  e  $b = (\varepsilon_r' \mu_r'' + \varepsilon_r'' \mu_r')$ .

Sendo assim, para se obter um fator de absorção elevado, porém em uma pequena espessura, é necessário que os valores de permissividade e permeabilidade sejam altos (SAVILLE, 2005).

A onda eletromagnética é composta pelos campos elétricos e magnéticos ortogonais entre si e perpendiculares à direção de propagação. Ambos os campos, quando em contato com a matéria interagem com esta e produzem forças em suas espécies carregadas

As espécies carregadas são normalmente encontradas em moléculas polares com dipolos permanentes, moléculas onde dipolos podem ser induzidos e nos elétrons que estão ao redor do núcleo dos átomos (SAVILLE, 2005). Um material dielétrico tem um arranjo de cargas que pode ser deslocado por um campo elétrico. Na presença de um campo externo, as cargas positivas e negativas se movem em direções opostas para compensar o campo elétrico aplicado (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003). Desta forma, estas cargas se tornam polarizadas. Esta interação das espécies carregadas com o campo elétrico dá origem aos processos de polarização atômica por orientação e eletrônico (SAVILLE, 2005).

Os processos de polarização afetam diretamente os valores de permissividade elétrica e, conseqüentemente, estão relacionados com a absorção apresentada pelos materiais (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003).

A polarização por orientação ocorre quando um campo elétrico atua sobre moléculas com momento de dipolo permanente. Quando uma molécula é formada, átomos se combinam dividindo elétrons, ocorrendo um rearranjo destes elétrons, gerando os momentos de dipolo permanente. Na ausência de um campo externo estes dipolos são orientados de forma aleatória. Na presença de um campo, a força aplicada gera um torque neste dipolo, fazendo com que esses girem para se alinharem ao campo aplicado, causando uma polarização por orientação. Se o campo mudar de direção, o torque também mudará. Essa rotação no dipolo causa mudanças no valor de  $\epsilon_r'$  e  $\epsilon_r''$ . O atrito destes momentos de dipolo com a estrutura do material gera os mecanismos de perda de energia (SAVILLE, 2005), (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003). Este tipo de polarização ocorre para baixas frequências, principalmente na faixa de micro-ondas, devido às massas das moléculas, que

geralmente são grandes. Este é o principal mecanismo de polarização da molécula de água.

A polarização atômica ocorre em níveis Inter atômicos quando o campo elétrico distorce o arranjo de átomos em uma molécula ou rede cristalina, por meio de modificação estrutural destes devido às vibrações. Este processo de polarização é explorado pelos métodos que utilizam espectroscopia de infravermelho. A polarização eletrônica ocorre a níveis subatômicos, onde o campo elétrico causa um deslocamento dos elétrons em relação a seus núcleos. Devido à pequena massa do elétron, este tipo de polarização ocorre em altas frequências.

Estes processos de polarização em função da frequência estão esquematizados na Figura 7, Comportamento de  $\epsilon_r'$  e  $\epsilon_r''$  em diferentes frequências, demonstrando os processos de polarização relativos a cada faixa de frequências (AGILENT TECHNOLOGIES, 2003).

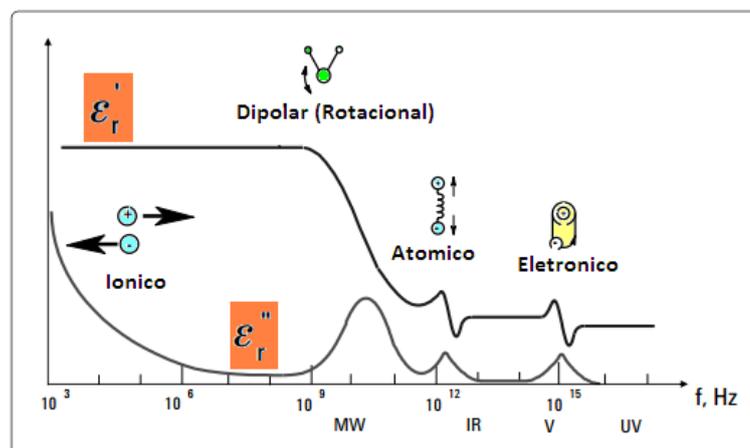


Figura 7 - Comportamento de  $\epsilon_r'$  e  $\epsilon_r''$  em diferentes frequências, demonstrando os processos de polarização relativos a cada faixa de frequências.

### II.1.5- Processo Atenuação Energia da Onda Eletromagnética por Filmes Finos

Quando um recobrimento apresenta espessuras inferiores à da espessura da camada pelicular, a onda eletromagnética incidente sobre uma dada superfície consegue penetrar na mesma, promovendo a formação de correntes de *Eddy* nesta superfície. Quando estas correntes surgem, o material pode, por meio de sua estrutura atômica, transformar a energia da onda eletromagnética incidente em calor, reduzindo desta forma o sinal da onda que retorna ao detector.

A propriedade de atenuação de filmes finos metálicos depositados sobre substratos poliméricos está relacionada diretamente com a espessura e com a condutividade do mesmo. Como conhecido da literatura de física geral e citado na patente norte americana PI6986942 (MAYES, 2006), metais atuam como espelhos para ondas eletromagnéticas incidentes, uma vez que refletem a radiação com o objetivo de manterem o campo elétrico na sua superfície igual a zero (ISHII,2004), (MAYES, 2006).

No entanto, a redução na espessura da superfície metálica, para valores abaixo da profundidade de penetração da onda no material, em uma dada frequência, promove a penetração da onda eletromagnética nesta superfície, provocando o surgimento de correntes elétricas no seu interior, as correntes de *Eddy*. E, como já mencionado, essas correntes penetram no material, atenuando os campos elétrico e magnético da onda eletromagnética incidente reduzindo seu valor inicial em uma taxa de 0,36 até a espessura da camada limite.

Algumas patentes citam este fenômeno. De acordo com a patente norte americana PI0035896 (FUJIEDA, 2005), para que partículas metálicas apresentem característica de atenuação da radiação eletromagnética, é necessário que possuam espessuras inferiores ao valor da profundidade de penetração da onda

(PERMAFROST, 1973), (FUJIEDA, 2005). Do mesmo modo, a patente PI6823816 (ISHI, 2004) cita que para que um campo elétrico ou magnético consiga penetrar em um corpo metálico é necessário que a espessura do material seja inferior à camada pelicular (ISHII,2004). Entretanto, é necessário levar-se em conta a profundidade de penetração para as maiores frequências na qual o material irá atuar, para que desta forma, possa ser realizado um ajuste da espessura do material com o objetivo de promover processos de atenuação da radiação eletromagnética naquela faixa de frequências (JANOS,1994).

Para que o processo de atenuação da energia ocorra, é necessário que exista no material, pontos de espalhamento de elétrons, de forma a transformar a energia cinética dos mesmos em energia térmica por meio de efeito Joule. Assim, a presença de defeitos ou impurezas no filme contribui para este espalhamento e conseqüentemente, para uma maior atenuação da energia incidente.

Estudos envolvendo a teoria da profundidade de penetração de ondas, relacionados com absorção de energia na faixa de micro-ondas por filmes finos, têm demonstrado que a redução da espessura do recobrimento promove a redução na condutividade, como é possível observar na Figura 8 (BHAT, 1998). Sabendo-se que esta propriedade elétrica é influenciada pelos parâmetros do processo de deposição, tais como pureza ou mistura do gás de trabalho, taxa de deposição e energia cinética das partículas evaporadas (SUN, 1999).

É verificado que filmes finos com espessuras da ordem da profundidade de penetração da onda, ou inferiores, tendem a mostrar valores de condutividade menores que aqueles apresentados pelo material em sua forma volumétrica, uma vez que aumenta a possibilidade da estrutura possuir uma maior incidência de descontinuidades. Deste modo, esta estrutura apresenta-se como um meio resistivo

à passagem das correntes de *Eddy* autoinduzidas na superfície, favorecendo a transformação da energia cinética dos elétrons em calor, reduzindo, desta forma, o sinal que retorna ao detector.

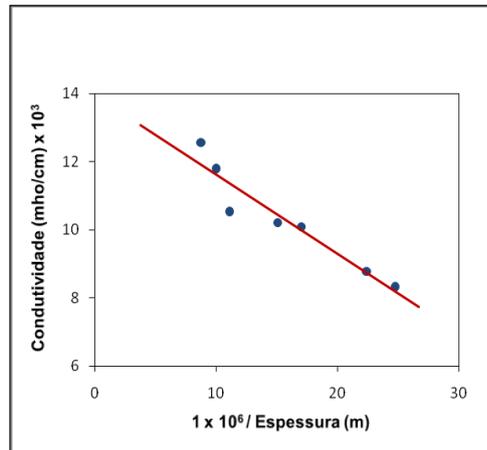


Figura 8 - Relação entre a espessura do revestimento e a condutividade.

Poucas publicações científicas fazem menção à atenuação da radiação eletromagnética por filmes finos metálicos. Entretanto, dentro da escassa literatura, a atenuação provocada por filmes finos metálicos é comumente relacionada com o efeito da profundidade de penetração da onda. Como exemplo, pode-se citar uma pesquisa que mostra que durante experimentos realizados com equipamentos de micro-ondas, que sofreram metalização não intencional de suas janelas por um material contaminante, tiveram essas janelas rompidas, devido ao aquecimento local promovido pela absorção da energia da radiação eletromagnética incidente na faixa de micro-ondas pelo filme metálico depositado (BOSMAN,2003), (BOSMAN,2004).

Quando a espessura do filme metálico possui espessuras muito inferiores à profundidade de penetração da onda ( $\delta$ ), o mesmo chega a absorver até 50% da radiação incidente. Quando essa espessura aumenta, o espaço para a corrente de

condução circular é maior, reduzindo, desta forma, a resistência equivalente do circuito formado entre o filme e o substrato.

Neste contexto, a Equação 7 relaciona a espessura de um filme( $L$ ) com a resistência equivalente de um circuito elétrico, que pode ser aproximado ao sistema filme/substrato (BHAT, 1998), (BOSMAN,2003)..

$$R_{eq} = \frac{1}{\sigma L} \cong \frac{1}{\sigma \delta} \quad (7)$$

Onde:

$\sigma$ = condutividade do filme e  $L$  = espessura do filme metálico

Uma vez que, filmes muito finos apresentam condutividade reduzida, a resistência equivalente, para filmes com pequenas espessuras, resulta em uma resistência elevada. Isto significa uma maior transformação, pelos filmes, da energia da onda eletromagnética em calor por meio de efeito Joule, uma vez que a superfície do filme apresenta-se mais resistiva. Devido ao processo de obtenção dos filmes finos ser manual, estes apresentam descontinuidades na forma final, os locais onde apresentam depósitos de substrato, chamam-se ilhas. No caso de filmes descontínuos, com espessuras da ordem de dezenas de nanômetros, a estrutura de ilhas altera as características de absorção. Nestes casos, pode-se fazer uma analogia do sistema filme/substrato com um circuito capacitivo/resistivo. Uma linha de transmissão equivalente a esta situação pode ser observada na Figura 9. Admitindo que a capacitância do filme esteja relacionada com as distâncias relativas entre cada uma dessas ilhas, pela Equação 8, pode-se verificar que no caso de filmes com descontinuidades significativas o valor da capacitância é reduzido, o que proporciona um maior valor da resistência devido aos vazios (BOSMAN,2004).

$$C = \frac{1}{g} \quad (8)$$

onde:

$g$  = distância relativa entre as ilhas do filme e  $C$  = Capacitância do filme

Nestes casos, o capacitor atua como um circuito aberto para altas frequências. Por outro lado, quando a superfície do filme possui uma alta capacitância, a absorção da energia de micro-ondas irá se tornar mais evidente para baixas frequências (BOSMAN,2004). Assim, pode-se concluir, a princípio, que filmes com estrutura de ilhas tendem a apresentar maior atenuação da energia da onda eletromagnética, na faixa de micro-ondas, em virtude da maior capacitância apresentada pelo recobrimento.

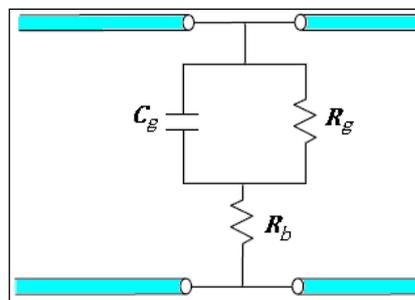


Figura 9 – Linha de transmissão equivalente para um filme fino com estrutura de ilhas.  $R_g$  representa a resistência apresentada pelas ilhas e  $R_b$  a resistência oferecida pelo material do filme (na forma volumétrica).

## II.2 – MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental consistiu de uma sequência de atividades, descritas em Objetivos Específicos. Para facilitar a compreensão do texto é apresentado na Figura 10 o fluxograma de execução do presente trabalho, sendo cada destas etapas descritas nos itens a seguir.

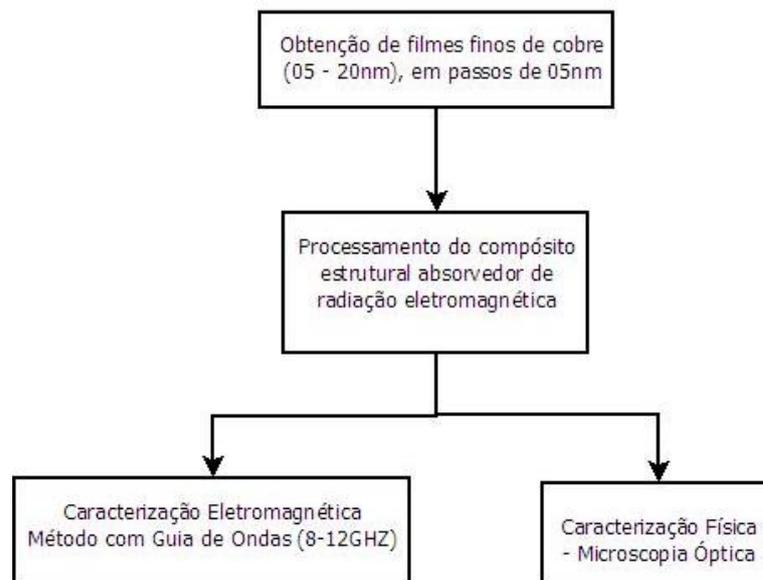


Figura 10 - Fluxograma geral da sequência de etapas realizadas no presente trabalho.

Uma parte fundamental deste trabalho foi a pesquisa bibliográfica e, em virtude desta tecnologia ser de uso restrito, principalmente das forças armadas, esta pesquisa foi realizada, além das pesquisas clássicas em livros textos, em *Sites* de patentes, principalmente na norte americana *USPTO (2014)*, bem como em instituições de pesquisas especializadas e *papers* de publicações específicas.

### **III.2.1 – Materiais e Equipamentos**

#### **III.2.1.1 – Câmara de Plasma**

Na Figura 11 é mostrada a câmara de plasma que foi utilizada para deposição dos filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética, constituída de aço inox com diâmetro interno de 0,9 m e comprimento interno de 1,0 m, onde estão instalados os seguintes equipamentos:

- 1 Magnetron Sputtering com diâmetro de 0,1524 m
- 1 Bomba de vácuo tipo Roots, marca Edwards Vacuum, modelo 1200IND
- 1 Bomba de vácuo tipo Mecânica, marca Edwards Vacuum, modelo E2M80
- 1 Bomba de vácuo tipo Difusora, marca Edwards Vacuum, modelo Diffstak250/2000
- 1 Controlador de Pressão Edwards TIC conectado a 3 medidores de pressão Edwards Pirane
- 1 Controlador de Pressão MKS 600 series conectado a 1 medidor de pressão Edwards Baratron e a 1 Troto Válvula.
- 1 Controlador de fluxo MKS Type 247 conectado a 4 Controladores de fluxo de massa MKS
- 1 Medidor de Espessura Edwards FTM7
- 1 Fonte de potência pulsada Plasma Liits PS10
- 1 Fonte de potência contínua Plasma Liits S10

Na Figura 11 (a) pode-se verificar uma visão geral da câmara de processos assistido a plasma instalado no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica, enquanto na Figura 11 (b) temos as dimensões desta câmara.

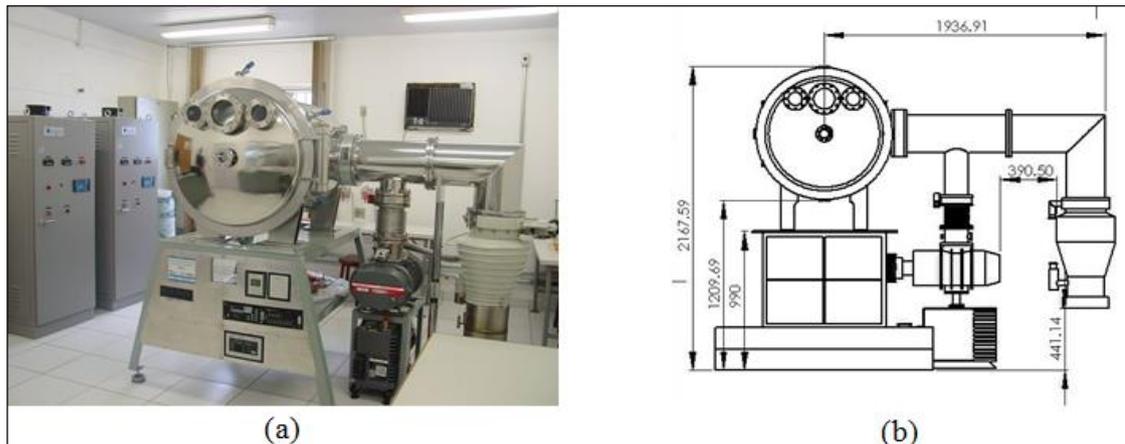


Figura 11 - (a) Visão geral da câmara de processos e (b) Dimensões da câmara.

### III.2.1.2 - Materiais de Consumo

Foram utilizados os seguintes materiais de consumo:

- Gás Argônio com 99% de pureza
- Alvo de Cobre com 6 polegadas de diâmetro e 99,99% de pureza
- Substrato do polímero PET (polietileno tereftalato), com 0,06 mm de espessura
- Acetona P.A.
- Luvas descartáveis
- Papel toalha

### III.2.2 Condições Obtenção dos Filmes Finos Absorvedores de Radiação Eletromagnética

Os filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética foram obtidos pela deposição de uma camada de cobre nas espessuras de 5, 10, 15 e 20 nm, em um substrato de PET (poli(tereftalato de etileno)) com 15,3  $\mu\text{m}$  de espessura, pela técnica *Magnetron Sputtering*, a partir de um alvo de cobre com 99,99% de pureza e diâmetro de 152,4 mm. Primeiramente o sistema foi evacuado para uma pressão

base de 0,05 mTorr, em seguida foi inserido gás argônio até uma pressão de trabalho de 50 mTorr. A distância do alvo para o substrato foi de 300 mm. Foi empregado uma corrente de 1,4 A e uma tensão de 166 V e taxa de deposição de 0,8 nm/s.

Para que todos os filmes fossem depositados sobre a mesma condição foi utilizado um porta-amostra com um sistema contínuo, permitindo a deposição de diversos filmes, sem a necessidade de abrir a câmara para a troca de amostras. A espessura dos filmes foi monitorada em tempo real por meio de um cristal de quartzo ressonador, onde o material evaporado é depositado simultaneamente no substrato e no cristal.

### **III.2.3 – Caracterização Eletromagnética**

A caracterização eletromagnética dos compósitos estruturais em guia de onda foi realizada no Laboratório de Guerra Eletrônica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, que possui um kit de guias de onda na banda X, acoplado a um analisador de redes da marca Agilent, modelo N5230C-RNA-L.

### **III.2.4 – Microscopia Óptica**

A microscopia óptica dos compósitos foi realizada no Laboratório de Materiais e Ensaio do Departamento de Engenharia Mecânica. A seção transversal dos compósitos foram visualizadas mediante o corte das amostras, em um microscópio estereoscópio da marca Zeiss, modelo Stemi 2000C, equipado com câmara digital de 5 megapixels e conectada a um computador com placa de aquisição de imagens e software de captura.

### III.2.5 – Metodologia Para Processamento dos Compósitos

Os compósitos estruturais atenuadores de radiação eletromagnética foram obtidos pela laminação de camadas de tecidos pré-impregnados (*prepreg*) de fibra de vidro/epóxi, fibra de carbono/epóxi, na configuração 4HS (urdume e trama, respectivamente), e filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética, organizados em três diferentes configurações, mostrados na Figura 13. Todos os compósitos foram consolidados com saco de vácuo e autoclave, segundo padrões aeronáuticos comumente utilizados nesta indústria.

Quanto à configuração HS (urdume e trama), os fios de urdume são os fios que são esticados longitudinalmente no compósito, e os fios de trama, os fios que correm transversalmente, conforme se pode observar na Figura 12.

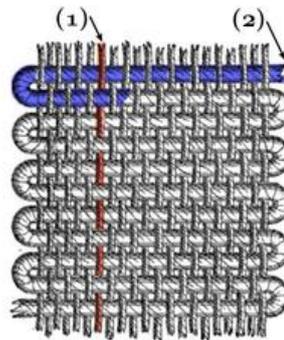


Figura 12 - Fio de Urdume (1) Fio de Trama (2)

A Figura 13 (a) possui a configuração de uma camada de tecido de fibra de carbono na parte inferior, cinco camadas de tecido de fibra de vidro, uma camada de filme fino absorvedor de radiação eletromagnética, e cinco camadas de fibra de vidro na parte superior. Assim, essa configuração é representada por  $1FC [5FV,1FF]_1$  5FV, onde FC é fibra de carbono, FF é filme fino absorvedor de radiação eletromagnética, FV fibra de vidro e o índice subscrito 1, após colchetes, indica o número de repetições destas camadas.

A Figura 13 (b) possui uma camada de tecido de fibra de carbono, três camadas de tecido de fibra de vidro e uma camada de filme fino absorvedor de radiação eletromagnética, tal configuração é repetida duas vezes, e são adicionadas mais três camadas de tecido de fibra de vidro. Assim, essa configuração é representada por  $1FC [3FV,1FF]_2 3FV$ . A Figura 13 (c) possui a configuração de uma camada de tecido de fibra de carbono, duas camadas de tecido de fibra de vidro e uma camada de filme fino absorvedor de radiação eletromagnética, configuração repetida por quatro vezes, e por final contém mais duas camadas de tecido de fibra de vidro, representada por  $1FC [2FV,1FF]_4 2FV$ .

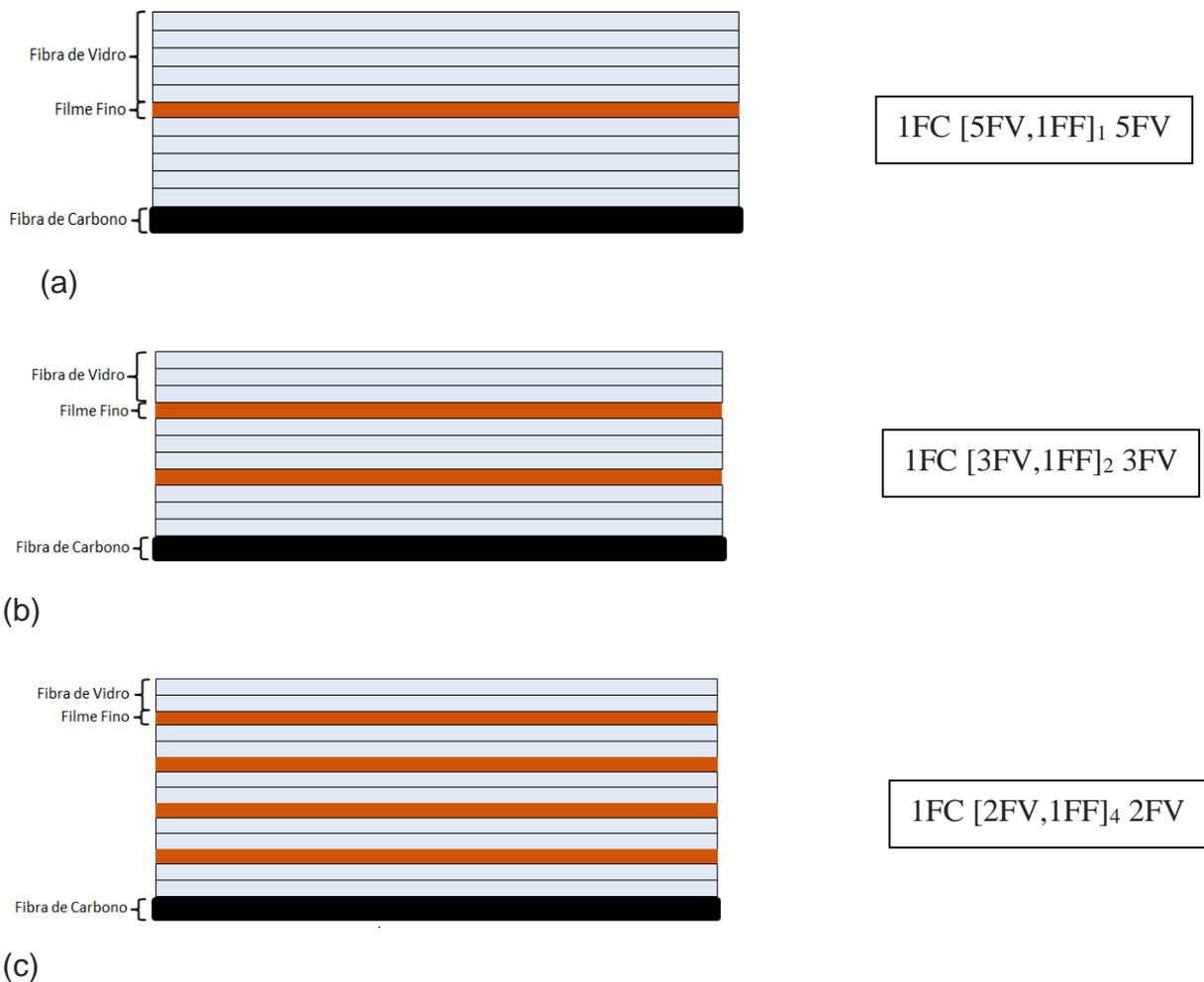


Figura 13 - Configurações do compósito estrutural atenuador de radiação eletromagnética.

Na Figura 13 podemos verificar as configurações do compósito estrutural atenuador de radiação eletromagnética, sendo: (a) utilização de uma camada de filme fino absorvedor, com configuração 1FC [5FV,1FF]<sub>1</sub> 5FV. (b) utilização de duas camadas de filme fino absorvedor, com configuração 1FC [3FV,1FF]<sub>2</sub> 3FV. (c) utilização de quatro camadas de filme fino absorvedor, com configuração 1FC [2FV,1FF]<sub>4</sub> 2FV.

Para cada uma das três configurações mostradas na Figura 13, foram fabricados cinco compósitos: um compósito somente com o elemento PET (FF), sem depósito da camada de cobre, denominado branco, e outros quatro compósitos, cada um com o substrato polimérico depositado nas espessuras de 5nm, 10nm, 15 nm e 20 nm, totalizando quinze tipos de compósito. A Tabela 1 mostra a configuração dos quinze compósitos fabricados no presente trabalho, onde FC é uma camada de tecido de fibra de carbono com o acréscimo de resina epóxi (*prépreg*), FV é uma camada de tecido de fibra de vidro e FF uma camada de filme fino absorvedor de radiação eletromagnética. A espessura do depósito de cobre no filme fino absorvedor de radiação eletromagnética (FF) é indicada pelo número sobrescrito ao lado direito das letras FF. No caso do branco, o número utilizado é zero (0 nm).

Tabela 1 - Configuração dos quinze tipos de compósitos.

<b>Configuração</b>	<b>FC</b>	<b>FV</b>	<b>FF</b>	<b>FV</b>	<b>FF</b>	<b>FV</b>	<b>FF</b>	<b>FV</b>	<b>FF</b>	<b>FV</b>
<b>Branco</b>										
1FC [5FV,1FF <sup>0nm</sup> ] <sub>1</sub> 5FV	1	5	1	5	-	-	-	-	-	-
1FC [3FV,1FF <sup>0nm</sup> ] <sub>2</sub> 3FV	1	3	1	3	1	3	-	-	-	-
1FC [2FV,1FF <sup>0nm</sup> ] <sub>4</sub> 2FV	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>5nm</b>										
1FC [5FV,1FF <sup>5nm</sup> ] <sub>1</sub> 5FV	1	5	1	5	-	-	-	-	-	-
1FC [3FV,1FF <sup>5nm</sup> ] <sub>2</sub> 3FV	1	3	1	3	1	3	-	-	-	-
1FC [2FV,1FF <sup>5nm</sup> ] <sub>4</sub> 2FV	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>10nm</b>										
1FC [5FV,1FF <sup>10nm</sup> ] <sub>1</sub> 5FV	1	5	1	5	-	-	-	-	-	-
1FC [3FV,1FF <sup>10nm</sup> ] <sub>2</sub> 3FV	1	3	1	3	1	3	-	-	-	-
1FC [2FV,1FF <sup>10nm</sup> ] <sub>4</sub> 2FV	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>15nm</b>										
1FC [5FV,1FF <sup>15nm</sup> ] <sub>1</sub> 5FV	1	5	1	5	-	-	-	-	-	-
1FC [3FV,1FF <sup>15nm</sup> ] <sub>2</sub> 3FV	1	3	1	3	1	3	-	-	-	-
1FC [2FV,1FF <sup>15nm</sup> ] <sub>4</sub> 2FV	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>20nm</b>										
1FC [5FV,1FF <sup>20nm</sup> ] <sub>1</sub> 5FV	1	5	1	5	-	-	-	-	-	-
1FC [3FV,1FF <sup>20nm</sup> ] <sub>2</sub> 3FV	1	3	1	3	1	3	-	-	-	-
1FC [2FV,1FF <sup>20nm</sup> ] <sub>4</sub> 2FV	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

O substrato do polímero PET (poli (tereftalato etileno)), foi colocado em uma porta amostra metálico (Figura 14 (a)) de 496 mm de largura, 545 mm de comprimento e 340 mm de altura. Na Figura 14 (b) é possível observar o filme flexível polimérico enrolado nos cilindros de bobinamento e tensionamento do filme. O sistema foi composto por cinco cilindros:

- 2 cilindros de aço inox – 420 mm de comprimento e 35 mm de diâmetro.
- 1 cilindro de aço inox – 300 mm de comprimento e 62 mm de diâmetro.
- 2 cilindros de aço inox – 350 mm de comprimento e 18 mm de diâmetro.

Os cilindros foram constituídos de aço inox, sendo responsáveis pelo desenrolamento e enrolamento do filme e pelo seu tensionamento no sistema – para um melhor aproveitamento na deposição de material, foi necessário que o plástico estivesse o mais tensionado possível. A coloração escura, incidente na zona frontal da caixa foi decorrente das seguidas deposições de materiais.

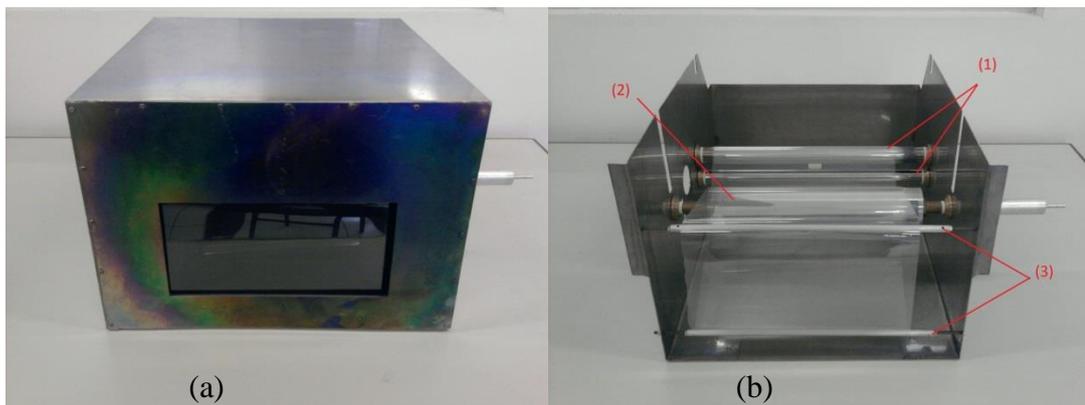


Figura 14 - (a) Porta amostra com a caixa protetora. (b) Sistema para produção de filmes finos contínuos, sem a caixa protetora.

O cristal do medidor de espessura MKS type 247 foi instalado ao lado da porta amostra, a 250 mm de distancia do alvo. O sistema foi evacuado até uma pressão base de 0,8 mTorr, em seguida foi inserido gás argônio com um fluxo de 115 sccm até uma pressão de trabalho de 2mTorr.

Para obtenção das condições de evaporação do cobre via processo assistido a plasma, foram feitos gráficos de tensão pela densidade de corrente, buscando atingir a curva de densidade anormal – indicado pela seta amarela – do Diagrama de Townsend (Figura 15). Para chegar a esses dados, foi necessário o controle da vazão de gás argônio, pressão, corrente e tensão de acordo com o especificado.

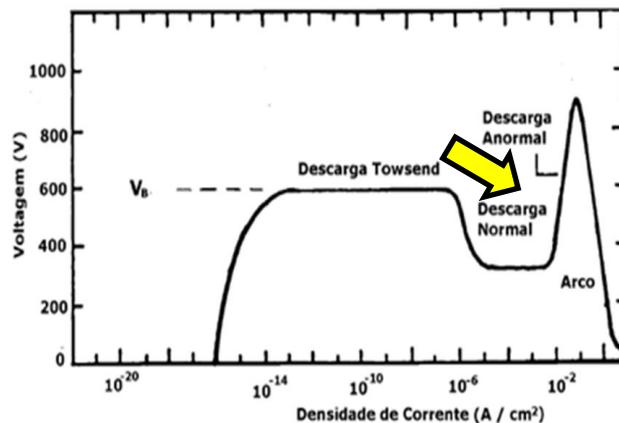


Figura 15 - Diagrama de Townsend, com sinalização da zona de descarga anormal.

### III.3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos das caracterizações realizadas nos materiais compósitos estruturais atenuadores de radiação eletromagnética obtidos: microscopia óptica da seção transversal e avaliação da atenuação da energia da onda eletromagnética na faixa de frequências compreendidas entre 8,2-12,4 GHz.

### III.3.1 Microscopia óptica dos compósitos obtidos

A Figura, nos itens 16(a), 16(b) e 16(c) mostra a micrografia óptica dos compósitos contendo filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética com depósito de cobre de 10 nm. Pode ser observado que os compósitos não contêm porosidade aparente, e o filme fino está bem consolidado no interior do compósito, indicado pelas setas vermelhas.

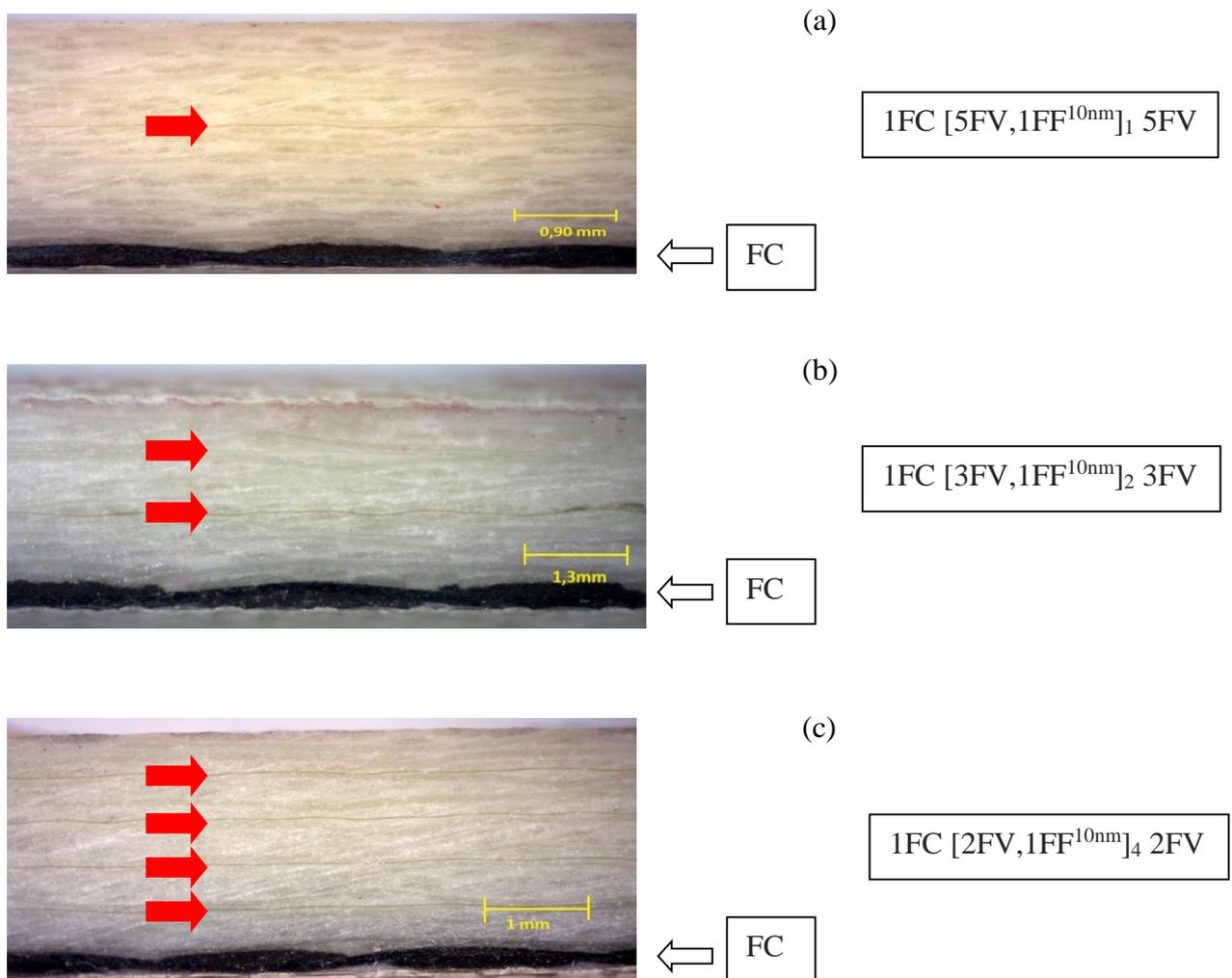


Figura 16 - Compósitos estruturais atenuadores de radiação eletromagnética com filmes finos de 10nm: (a) Configuração  $1FC [5FV, 1FF^{10nm}]_1 5FV$ . (b) Configuração  $1FC [3FV, 1FF^{10nm}]_2 3FV$ . (c) Configuração  $1FC [2FV, 1FF^{10nm}]_4 2FV$ .

A Figura 17 mostra a medida das espessuras das camadas das arquiteturas das configurações mostradas na Figura 16, medidas pelo software de análise de imagens acoplado ao microscópio óptico. A partir das medidas realizadas, pode-se verificar que cada camada de tecido de fibra de vidro apresenta, em média, uma espessura de 220  $\mu\text{m}$  (0,22 mm), típica de compósitos processados a partir de tecidos *prepreg* e consolidados via saco de vácuo e autoclave, segundo processo utilizado na indústria aeronáutica. Cada substrato polimérico composto de PET com camada de cobre possui 15,32  $\mu\text{m}$  de espessura, e o tecido de fibra de carbono apresenta uma espessura de 240  $\mu\text{m}$ .

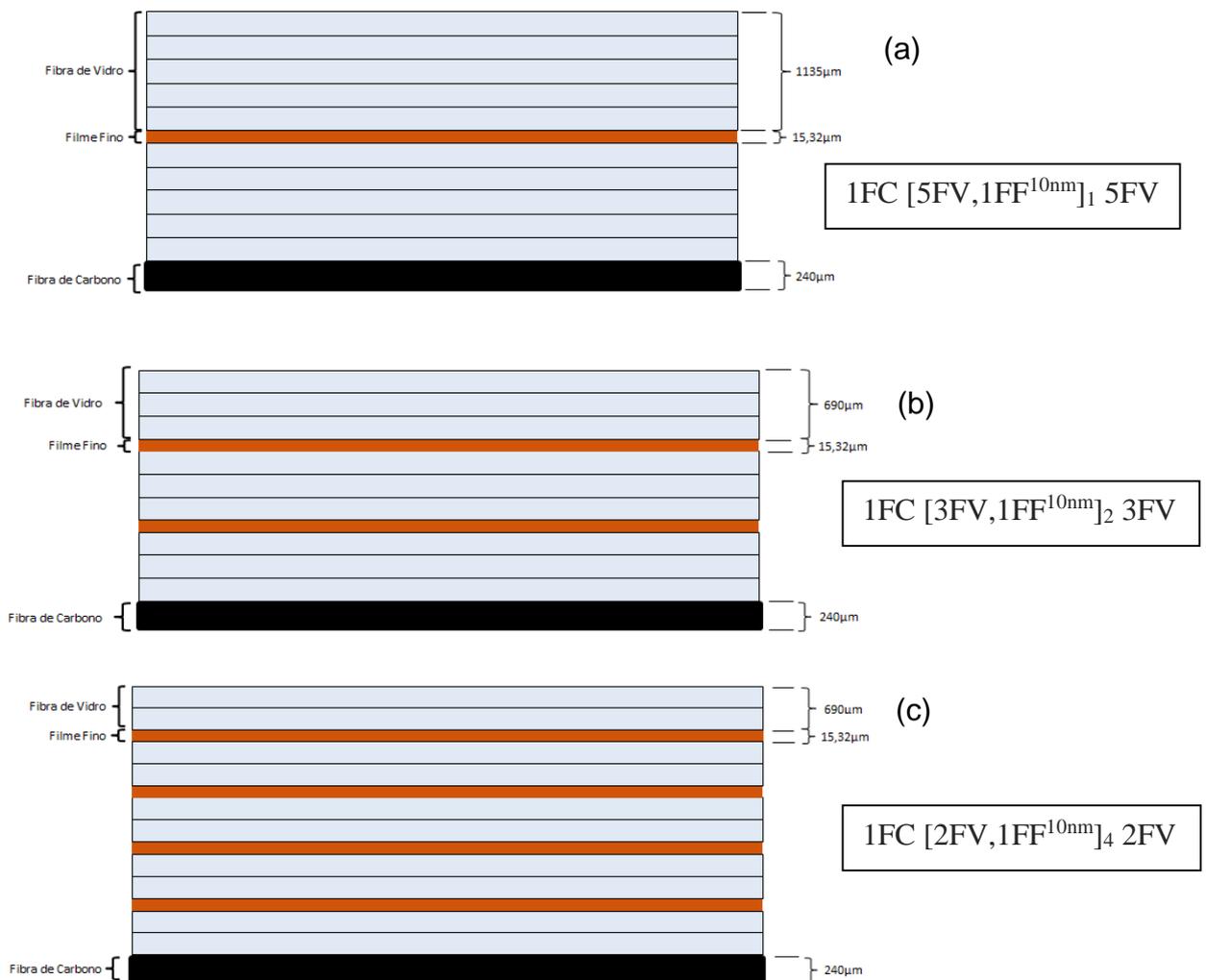


Figura 17 - Medidas das espessuras das configurações do compósito estrutural atenuador de radiação eletromagnética

Os compósitos obtidos com os filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética com espessuras de 5, 15 e 20 nm, bem como o branco, apresentam os mesmos valores de espessura das camadas da Figura 17, mantendo o padrão estabelecido, bem como a mesma morfologia da seção transversal apresentada na Figura 16. Por esses motivos, as microscopias ópticas desses compósitos são apresentadas no Apêndice A.

A camada metal depositada no substrato do filme fino, via *Magnetron Sputtering*, nas espessuras de 5, 10, 15 e 20 nm, foram obtidas conforme indicado na Figura 18.

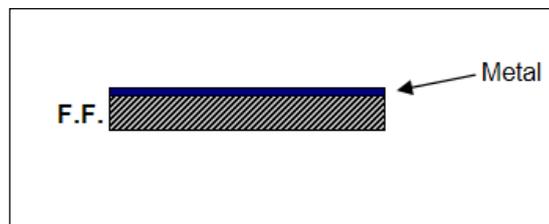


Figura 18 - Exemplo de camada de substrato de metal sobre o Filme Fino.

### III.3.2 Caracterização eletromagnética dos compósitos obtidos

O gráfico da Figura 19 apresenta as medidas da atenuação da energia da onda eletromagnética das três configurações do branco apresentadas na Figura 13, sem a deposição de cobre sobre o substrato polimérico de PET. Primeiramente pode-se observar que todos os compósitos apresentam algum valor de refletividade da energia da onda eletromagnética, entre -0,5 dB a -3,8 dB. A configuração com quatro (4) camadas de filme fino ( $1FC [2FV, 1FF^{0nm}]_4 2FV$ ) apresenta em média os

maiores valores de atenuação, em relação às configurações com um (1) filme fino ( $1FC [5FV, 1FF^{0nm}]_1 5FV$ ) e dois (2) filmes finos ( $1FC [3FV, 1FF^{0nm}]_2 3FV$ ), e também apresenta duas regiões da curva com perfil banda curta, uma delas com máximo em torno de 8,6 GHz e outra com máximo em 11,9 GHz. O perfil banda curta também é visível na configuração do compósito com um (1) filme fino ( $1FC [5FV, 1FF^{0nm}]_1 5FV$ ), com máximo da ressonância em 9,5 GHz, e na configuração com dois (2) filmes finos ( $1FC [3FV, 1FF^{0nm}]_2 3FV$ ), com provável máximo em frequências inferiores a 8,2 GHz.

Os dados do gráfico da Figura 19 mostram que sistemas multicamadas apresentam refletividade da energia da onda eletromagnética, mesmo sem a presença de centros absorvedores de radiação eletromagnética. Este comportamento, também denominado banda estreita ou ressonante (tipo N), se deve aos processos de interferência entre as ondas incidentes e refletidas, como descrito na Figura 5 (a) (REZENDE, 2000).

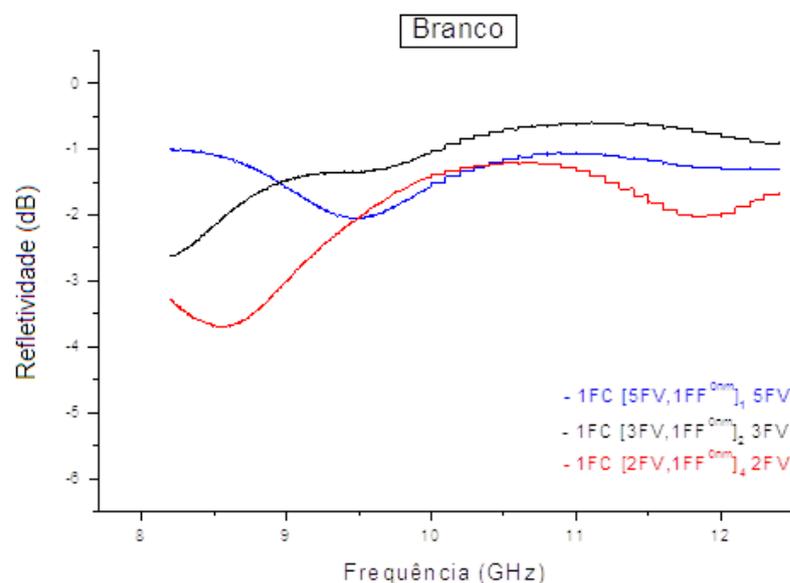


Figura 19 - Curva refletividade (dB) versus frequência (8,2-12,4 GHz) para compósito branco, configurações  $1FC [5FV, 1FF^{0nm}]_1 5FV$ ,  $1FC [3FV, 1FF^{0nm}]_2 3FV$  e  $1FC [2FV, 1FF^{0nm}]_4 2FV$ .

O gráfico da Figura 20 apresenta as medidas da refletividade da energia da onda eletromagnética das três configurações dos compósitos, com filme fino absorvedor de radiação eletromagnética baseado em cobre, com 5nm de espessura. Em comparação ao branco (Figura 19), os compósitos com filme fino de 5nm apresentam um comportamento eletromagnético distinto para cada uma das três configurações, e demonstra que a deposição de uma camada de cobre com 5 nm de espessura altera a resposta eletromagnética do compósito.

A configuração com quatro (4) filmes finos (1FC [2FV,1FF<sup>5nm</sup>]<sub>4</sub> 2FV) apresenta um comportamento ressonante com intensidade máxima de -5,8 dB em 8,2 GHz, e outro comportamento ressonante com provável aumento de intensidade em frequências superiores a 12,4 GHz. As outras duas configurações dos compósitos, 1FC [5FV,1FF<sup>5nm</sup>]<sub>1</sub> 5FV e configuração 1FC [3FV,1FF<sup>5nm</sup>]<sub>2</sub> 3FV, apresentam um comportamento banda larga, com refletividade entre -0,1 dB a -0,6 dB.

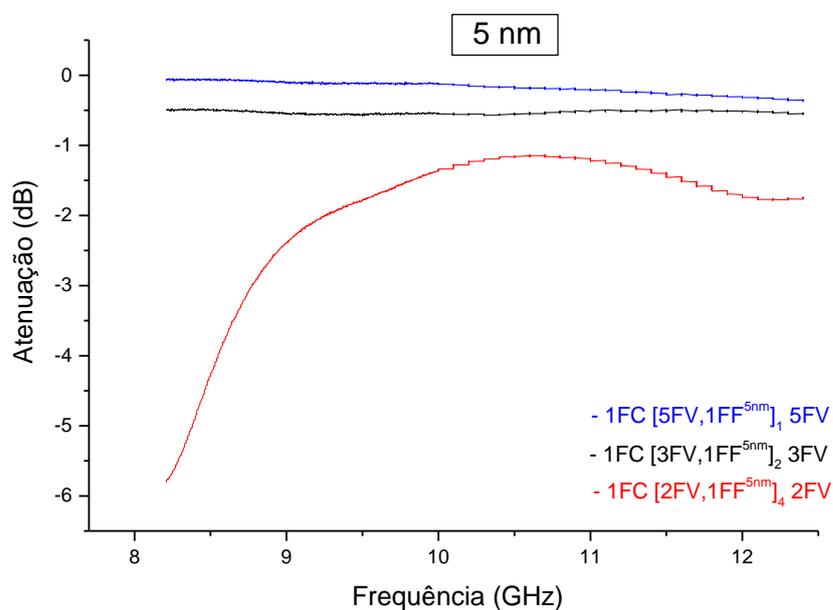


Figura 20 - Curva de atenuação (dB) versus frequência (8,2-12,4 GHz) para compósitos nas configurações 1FC [5FV,1FF<sup>5nm</sup>]<sub>1</sub> 5FV, 1FC [3FV,1FF<sup>5nm</sup>]<sub>2</sub> 3FV e 1FC [2FV,1FF<sup>5nm</sup>]<sub>4</sub> 2FV.

O gráfico da Figura 21 apresenta as medidas da refletividade da energia da onda eletromagnética das três configurações dos compósitos, com filme fino absorvedor de radiação eletromagnética baseado em cobre, com 10 nm de espessura. Em comparação ao branco (Figura 19) e compósitos com filme fino de 5nm (Figura 20), os compósitos com filme fino de 10 nm apresentam um comportamento eletromagnético distinto para cada uma das três configurações. Esse comportamento demonstra que a deposição de uma camada de cobre com 10 nm de espessura altera a resposta, demonstrando um novo comportamento eletromagnético do compósito, em relação à espessura de 5nm e o branco.

A configuração com dois (2) filmes finos de 10 nm ( $1FC [3FV, 1FF^{10nm}]_2 3FV$ ) apresenta um comportamento com perfil em V (ressonante) e a maior refletividade entre as três configurações, com máximo de -2,7 dB em 9,6 GHz. A configuração com quatro (4) filmes finos de 10 nm ( $1FC [2FV, 1FF^{10nm}]_4 2FV$ ) apresenta um comportamento banda larga, com refletividade entre -0,5 dB (8,2 GHz) a -0,9 dB (12,4 GHz), e a configuração com dois (2) filmes finos de 10 nm ( $1FC [3FV, 1FF^{10nm}]_2 3FV$ ) um comportamento com perfil em V, com máximo de -1,6 dB em 9 GHz, e o restante da curva com comportamento banda larga, entre -1,0 dB e -1,7 dB.

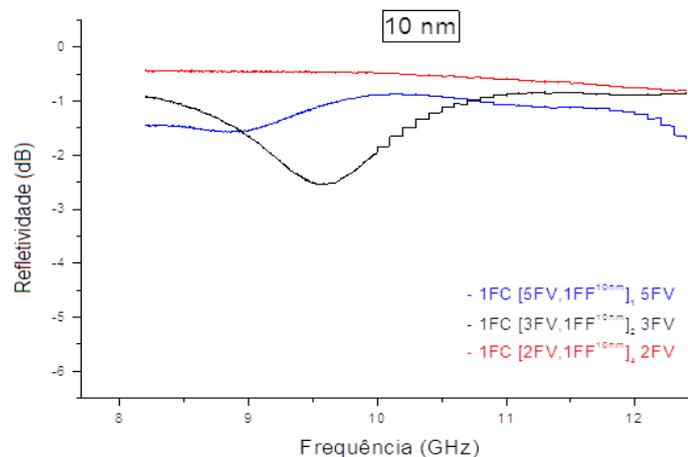


Figura 21 - Curva refletividade (dB) x frequência (8,2-12,4 GHz) para configurações  $1FC[5FV, 1FF^{10nm}]_1 5FV$ ,  $1FC[3FV, 1FF^{10nm}]_2 3FV$  e  $1FC[2FV, 1FF^{10nm}]_4 2FV$ .

O gráfico da Figura 22 apresenta as medidas da refletividade da energia da onda eletromagnética das três configurações dos compósitos, com filme fino absorvedor de radiação eletromagnética baseado em cobre, com 15 nm de espessura. Em comparação ao branco (Figura 19) e compósitos com filme fino de 5nm (Figura 20) e filme fino de 10 nm (Figura 21), os compósitos com filme fino de 15 nm demonstra um novo comportamento eletromagnético do compósito, distinto para cada uma das três configurações.

A configuração com um (1) filme fino (1FC [5FV,1FF<sup>15nm</sup>]<sub>1</sub> 5FV) apresenta um comportamento com perfil em V (ressonante) com máximo de -10,8 dB em 9,3 GHz, e entre 8,5 GHz até 10,5 GHz, uma refletividade de no mínimo -2,0 dB. A configuração com dois (2) filmes finos (1FC [3FV,1FF<sup>15nm</sup>]<sub>2</sub> 3FV) apresenta em média um comportamento banda larga, com uma ressonância de baixa intensidade (-1,8 dB em 9,6 GHz), e a configuração com quatro (4) filmes finos (1FC [2FV,1FF<sup>15nm</sup>]<sub>4</sub> 2FV) uma provável ressonância com máximo em frequências inferiores a 8,2 GHz, bem como uma ressonância de baixa intensidade por volta de 11,3 GHz (-1,7 dB).

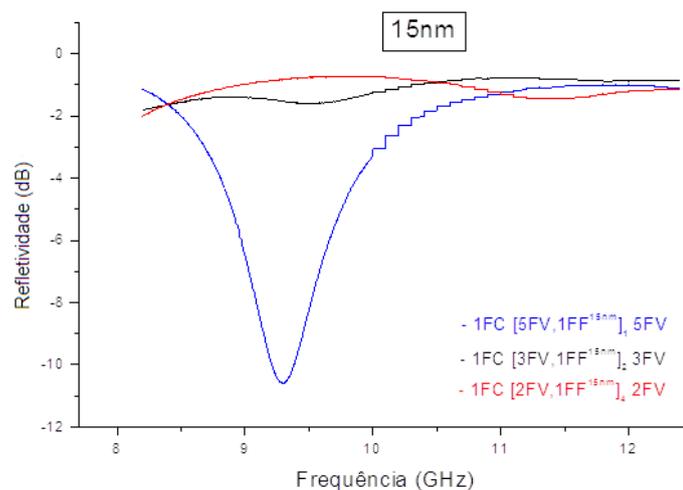


Figura 22 - Curva refletividade (dB) x frequência (8,2-12,4 GHz) para configurações 1FC[5FV,1FF<sup>15nm</sup>]<sub>1</sub> 5FV, 1FC [3FV,1FF<sup>15nm</sup>]<sub>2</sub> 3FV e 1FC [2FV,1FF<sup>15nm</sup>]<sub>4</sub> 2FV.

O gráfico da Figura 23 apresenta as medidas da refletividade da energia da onda eletromagnética das três configurações dos compósitos, com filme fino absorvedor de radiação eletromagnética baseado em cobre, com 20 nm de espessura. Assim como observado nos gráficos anteriores, a resposta eletromagnética é distinta para todas as três configurações em comparação ao branco (Figura 19), e compósitos com filme fino de 5nm (Figura 20), filme fino de 10 nm (Figura 21) e os compósitos com filme fino de 15 nm (Figura 22).

A configuração com um (1) filme fino de 20 nm ( $1FC [5FV, 1FF^{20nm}]_1 5FV$ ) apresenta um comportamento com perfil em V (ressonante) e a maior atenuação entre as três configurações, com máximo de -3,5 dB em 8,5 GHz. A configuração com quatro (4) filmes finos de 20 nm ( $1FC [2FV, 1FF^{20nm}]_4 2FV$ ) apresenta um provável máximo de uma ressonância em frequências superiores a 12,4 GHz, e a configuração com dois (2) filmes finos de 20 nm ( $1FC [3FV, 1FF^{20nm}]_2 3FV$ ) um comportamento banda larga.

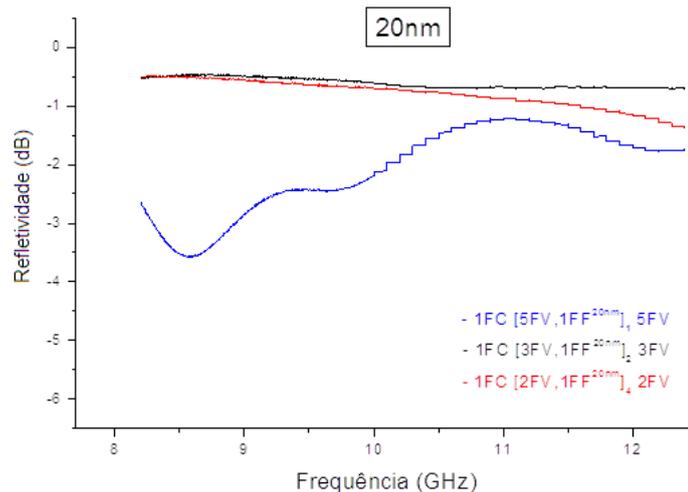


Figura 23 - Curva refletividade (dB) versus frequência (8,2-12,4 GHz) para compósitos nas configurações  $1FC [5FV, 1FF^{20nm}]_1 5FV$ ,  $1FC [3FV, 1FF^{20nm}]_2 3FV$  e  $1FC [2FV, 1FF^{20nm}]_4 2FV$ .

O gráfico da Figura 24 apresenta as medidas da refletividade da energia da onda eletromagnética para a configuração do compósito com 1 filme fino (1FC [5FV,1FF]<sub>1</sub> 5FV), relativas ao branco e filmes finos com espessura de 5, 10, 15 e 20 nm. Os dados foram retirados dos gráficos das Figuras 19 a 23, e organizados em um único gráfico para facilitar a comparação. Excetuando o compósito com filme fino de 5nm, todos com compósitos com a configuração 1FC [5FV,1FF]<sub>1</sub> 5FV apresentam um comportamento da curva com perfil em V e seu máximo na banda X, indicados pelas setas vermelhas, comprovando que nos compósitos obtidos, o principal mecanismo de atenuação da energia da onda eletromagnética está ligado ao processo de interferência entre as ondas incidentes e refletidas.

Entre os compósitos obtidos, a maior refletividade foi observada para o compósito com espessura do filme fino de 15 nm (-10,8 dB) enquanto que os outros compósitos apresentam refletividade entre -0,2 dB a -4,0 dB. Os dados obtidos mostram que 5nm de diferença de espessura para um único filme fino no interior do compósito, para as espessuras estudadas, é capaz de mudar expressivamente sua resposta eletromagnética.

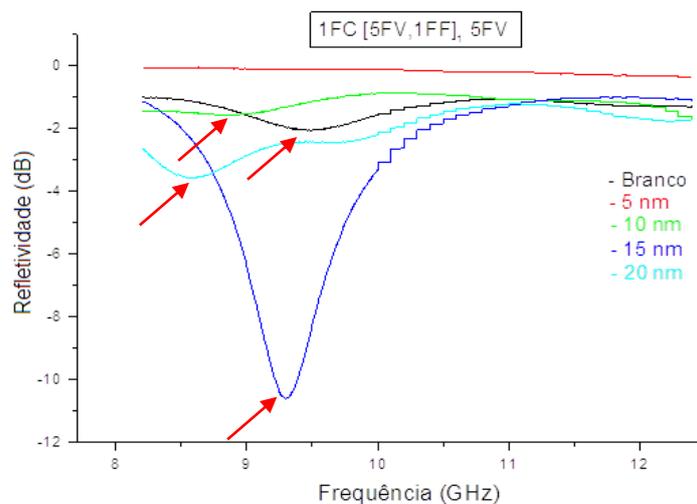


Figura 24 - Curva refletividade (dB) x frequência (8,2-12,4 GHz) para configurações 1FC[5FV,1FF]<sub>1</sub> 5FV, com filme fino nas espessuras de 5, 10, 15, 20nm e branco.

O gráfico da Figura 25 apresenta as medidas da refletividade da energia da onda eletromagnética para uma mesma configuração do compósito, com dois (2) filmes finos (1FC [3FV,1FF]<sub>2</sub> 3FV), relativas ao branco e filmes finos de 5, 10, 15 e 20 nm. Assim como o gráfico da Figura 24, os dados foram retirados dos gráficos das Figuras 19 a 23, e organizados em um único gráfico para facilitar a visualização comparativa.

Os compósitos 15 nm e 10 nm apresentam um máximo de ressonância na banda X, enquanto que o compósito branco apresenta um máximo tendendo a frequências inferiores a 8,2 GHz, indicados pelas setas vermelhas, comprovando que nesses compósitos o principal mecanismo de atenuação da energia da onda eletromagnética está ligado ao processo de interferência entre as ondas incidentes e refletidas. Os compósitos 5nm e 20 nm apresentam um comportamento banda larga. Os dados obtidos mostram que na configuração estudada, 5nm de diferença de espessura para dois filmes finos no interior do compósito, a resposta eletromagnética é alterada expressivamente.

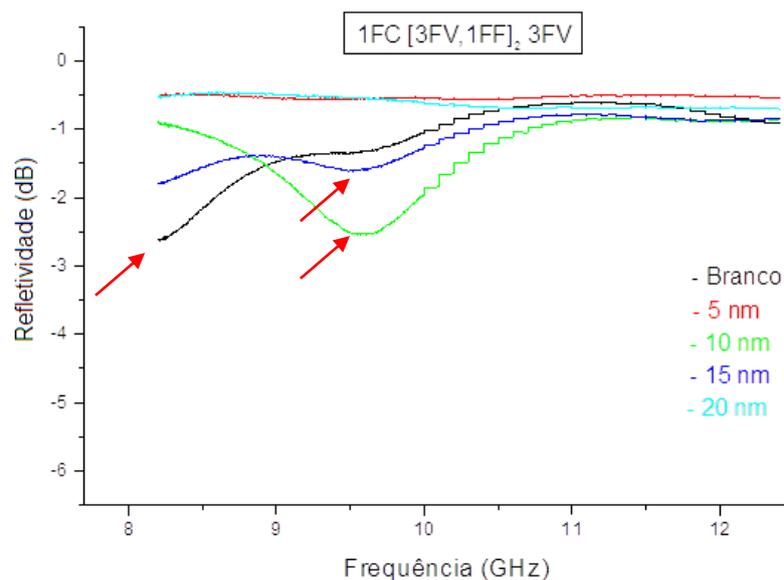


Figura 25 - Curva refletividade (dB) x frequência (8,2-12,4 GHz) para configurações 1FC [3FV,1FF]<sub>2</sub> 3FV, com filme fino nas espessuras de 5, 10, 15, 20 nm e branco.

O gráfico da Figura 26 apresenta as medidas da refletividade da energia da onda eletromagnética para uma mesma configuração do compósito, com quatro (4) filmes finos ( $1FC [2FV,1FF]_4 2FV$ ), relativas ao branco e filmes finos de 5, 10, 15 e 20 nm. Assim como os gráficos das Figuras 24 e 25, esses dados foram retirados dos gráficos das Figuras 19 a 23, e organizados em um único gráfico para facilitar a visualização comparativa. Os compósitos branco, 5nm e 15 nm apresentam um comportamento ressonante, com máximos indicados pelas setas vermelhas, e os compósitos 10 nm e 20 nm apresentam um provável máximo da ressonância em frequências superiores a 12,4 GHz. Além da dependência da resposta eletromagnética com a espessura dos filmes finos, todos os compósitos apresentam comportamento ressonante.

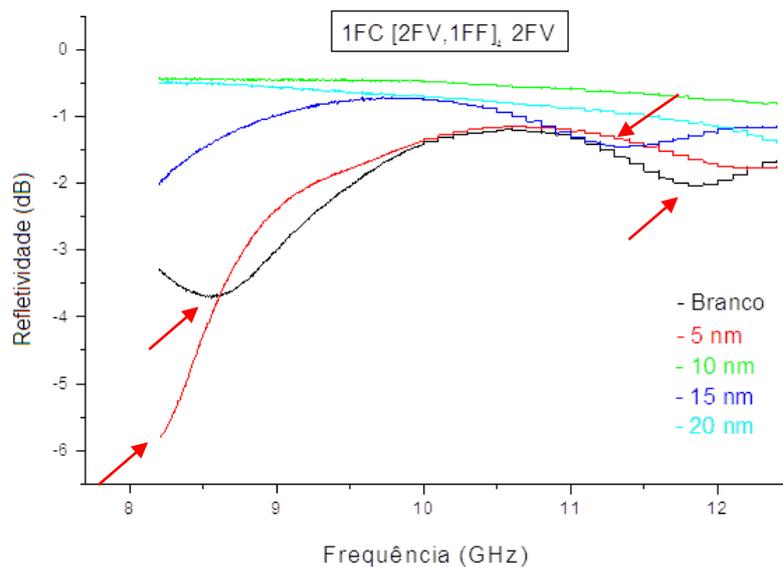


Figura 26 - Curva de refletividade (dB) versus frequência (8,2-12,4 GHz) para os compósitos na configuração  $1FC [2FV,1FF]_4 2FV$ , com filme fino nas espessuras de 5, 10, 15, 20 nm e branco.

### III - CONCLUSÕES

A partir de um processo utilizado na indústria para fabricação de materiais compósitos avançados, envolvendo a utilização de tecidos pré-impregnados (fibras de vidro e carbono), saco de vácuo e auto-clave, foi possível obter compósitos estruturais atenuadores de radiação eletromagnética, pela intercalação de filmes finos do polímero poli(tereftalato etileno) entre as camadas de tecidos de fibra de vidro e carbono.

Todos compósitos obtidos, em quinze tipos diferentes, pela variação da quantidade de camadas de tecidos de fibra de vidro e carbono (três configurações), e filmes finos de cobre com diferentes espessuras (5, 10, 15 e 20 nm), mostraram pelas análises de microscopia óptica: ausência de delaminação após a cura em autoclave, ausência de porosidade aparente, e espessura final do compósito dentro dos valores recomendadas pelos fornecedores de tecidos pré-impregnados.

Todos os quinze compósitos apresentaram diferentes atenuações da energia da onda eletromagnética: a resposta de atenuação eletromagnética dos compósitos se mostrou dependente da espessura do filme fino de cobre utilizado, e para todas as espessuras utilizadas, de 5, 10, 15 e 20 nm, foram obtidas curvas de atenuação distintas. Igualmente, a resposta da atenuação eletromagnética dos compósitos também se mostrou dependente da configuração utilizada da quantidade de camadas de tecido de fibras de vidro, carbono e filmes finos de poli(tereftalato etileno) com e sem deposição de cobre.

Todos os compósitos obtidos apresentaram algum nível de atenuação da energia da onda eletromagnética, entre -0,1 dB até -11 dB, sendo o perfil predominante na curva de atenuação, entre 8,2 – 12,4 GHz foram de um material com caráter ressonante, também denominado banda estreita ou ressonante (tipo N), e se deve aos processos de interferência entre as ondas incidentes e refletidas.

Portanto, os materiais analisados nas configurações citadas, apresentaram propriedades capazes de proporcionar ambientes de compatibilidade eletromagnética podendo, assim, serem utilizados na aviação civil em locais onde a interferência entre equipamentos influencia o funcionamento correto destes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELAZIZ, A.A., A Novel Technique for Improving the Performance of Salisbury Screen, **Progress In Electromagnetics Research Letters**, v.1, pp.1-8, 2008.

AGILENT TECHNOLOGIES. Basics of measuring the dielectric properties of material. **Application note 1217-1.5989-2589EN**. USA, 32 p., 2005.

AGILENT TECHNOLOGIES. Solutions for measuring permittivity and permeability with LCR meters and impedance analyzers. **Application note 1369-1**. 28 p. 2003.

ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS – ALMACO. **Retração da Indústria Prejudica Setor de Compósitos**. São Paulo, 2015. Disponível em <[www.almaco.org.br](http://www.almaco.org.br)>. Acesso em 23 Jun. 2015.

BALANIS, C. A., **Antenna Theory: analysis and design**. New York: John Wiley Sons, 1989a.

BHAT, K. S.; DATTA, S. K.; SURESH, C. Electrical and microwave characterization of kanthalthin films: temperature and size effect, **Thin Solid Films** 332 (1998) 220-224.

BOSMAN, H., LAU, Y.Y., GILGENBACH, R.M., Microwave Absorption in a Thin Film, **Applied Physics Letters**, v.82 (9), pp.1353, 2003.

BOSMAN, H., LAU, Y.Y., GILGENBACH, R.M., Power absorption by thin films on microwave windows , **IEEE Transactions on Plasma Science**, v.32 (3), 2004.

BREGAR, V.B., Advantages of Ferromagnetic Nanoparticle Composites in Microwave Absorbers, **IEEE Transactions on Magnetics**, v.40 (3), pp. 1679-1684, 2004.

BRITANNICA ONLINE ENCYCLOPEDIA. Nanotechnology, 2012. Disponível em: <[global.britannica.com/EBchecked/topic/962484/nanotechnology](http://global.britannica.com/EBchecked/topic/962484/nanotechnology). Acesso em: 15 dez. 2012.

CALLISTER W.D. Materials Science and Engineering An Introduction. John Wiley&Sons, Inc., New York, NY, 1991.

CANEVAROLO Jr., S. V. Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª Ed.-- São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Materiais avançados 2010-2022**. Brasília, DF, 2010.

CHUNG, B.K., CHUAH, H.-T., Modeling of RF absorber for application in the design of anechoic chamber, **Progress in Electromagnetics Research**, v.43, p273-285, 2003.

COMPOSITES WORLD. **Composites 2014: A Multitude of Markets**. Cincinnati, USA. 2014. Disponível em >compositeworld.com. Acesso em 01 Oct. 2014.

DEFENSE INDUSTRY DAILY. Stiletto Stealth Ships: Look Different. Ride Different. Buy Different. Disponível em: <http://www.defenseindustrydaily.com/stiletto-stealth-ships-look-different-ride-different-buy-different-01834/>. Acesso em 01/08/2014.

EMMERSON & CUMMING. World Wide Web: [www.emmersoncummingmp.com](http://www.emmersoncummingmp.com) Acesso em 20 Jul 2014.

EMERSON, W. H. Eletromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years. **IEEE Transactionson Antenas and Propagation**. v.21 (4), Julho, pp.383-388, 1973.

ETC GROUP – Grupo de Ação em Erosão, Tecnologia e Concentração, **Manual de Bolso das Tecnologias em Nanoescala... e a Teoria do “Little Bang”**; Jun. 2005.

FANG, Z., CHUSEN, L., SUN, J., ZHANG, H., ZHANG, J., The electromagnetic characteristics of carbon foams, **Carbon**. v.45, pp. 2873-2879, 2007

FUJIEDA, T., et al. Electromagnetic Wave Absorption material and an associated device. **US Patente** N° 0035896, 2005.

GAMA, A. M.; REZENDE, M. C.; DANTAS, C. C. Dependence of microwave absorption properties on ferrite volume fraction in MnZn ferrite/rubber radar

absorbing materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** 323 (2011) 2782–2785; Jun. 2011.

HASHSISH, E.A., Design of wideband thin layer planar absorber, **Journal of Electromagnetic Waves and Appl**, v.16 (2), pp.227-241, 2002.

HECK, C., **Magnetic Materials and their Applications**. Vol. 2. Standard Elektrik Lorenz AG, ITT. London, Butterworths, 1992.

HILZA, M. et al, **US Patent** N° 4960633, 1990.

ISHII, N., YASAKA, Y., **U.S. Patent** N° 6823816, 2004.

JALALI, M.; DAUTERSTEDT, S.; MICHAUD, A.; WUTHRICH, R. Electromagnetic shielding of polymer–matrix composites with metallic nanoparticles. **Composites: Part B**; 42 (2011) 1420–1426; May. 2011.

JANG, H.; CHOI, W.; KIM, C.; KIM, J.; LIM, D. Manufacture and characterization of stealth wind turbine blade with periodic pattern surface for reducing radar interference. **Composites: Part B**; 56 (2014) 178–183; Aug. 2013.

JANOS, W.A., **US Patent** N° 5298903, 1994.

JOHNSON, R. N. Radar-Absorbing Material: A Passive Role in an Active Scenario. **The International Countermeasure Handbook**. 11<sup>th</sup> edition; Jan, 1986.

KAMCHI, N.; BELAABED, B.; WOJKIEWICZ, J.; LAMOURI, S.; LASRI, T. Hybrid Polyaniline/Nanomagnetic Particles Composites: High Performance Materials for EMI Shielding. **Journal Applied Polymer Science**; 127: 4426–4432, 2013

KIM, J.B., LEE, S.K., KIM, C.G., Comparison study on the effect of carbon nano materials for single-layer microwave absorber in X band, **Composites Science and Technology**, 2007.

KLEMPERER, C. J.; MAHARAJ, D. Composite electromagnetic interference shielding materials for aerospace applications. **Composite Structures**; 91 (2009) 467–472; Apr. 2009.

KV Microwave Materials. World Wide Web: [www.kvmmindia.com](http://www.kvmmindia.com) Acessoem 20 Jul 2014.

LEE, S. M. **International Encyclopedia of Composites**. VCH Publishers, v. 6. p. 404-430. 1991.

MAYES, E., **US Patent** N° 6986942, 2006.

MIACCI, M. A. S.; NOHARA, E. L.; MARTIN, I. M.; PEIXOTO, G. G.; REZENDE, M. C. Indoor Radar Cross Section Measurements of Simple Targets. **Journal of aerospace technology and management**, vol 4, pp. 25-32, Jan-Mar, 2012.

MICHELI, D.; APOLLO, C.; PASTORE, R.; MORLES, R. B.; LAURENZI, S.; MARCHETTI; M. Nanostructured composite materials for electromagnetic interference shielding applications. **Acta Astronautica**; 69 (2011) 747–757; Jun. 2011.

MILANEZ, D. H. Nanotecnologia: Indicadores Tecnológicos Sobre os Avanços em Materiais a Partir da Análise de Documentos de Patentes. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Divisão de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, São Carlos, SP – Brasil. 2011.

NIE, Y., HE, H.H., GONG, R.Z., ZHANG, X.C., The electromagnetic characteristics and design of mechanically alloyed Fe-Co particles for electromagnetic wave absorber, **Journal of Magnetism and magnetic materials**, v.310, p.13-16, 2007.

NOVAS TECNOLOGIAS, Nanotecnologia a Manipulação do Invisível, Centro Ecológico, Brasil, p. 1-49, 2009.

ORING, M., **The Materials Science of Thin Films**, Stevens Institute of Technology, Academic Press, San Diego, 1991.

PAPOULIAS, S.A et al, **US Patent** N° 5147718, 1992

PEREIRA, J. J.; **Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de microondas via medidas de permissividade e permeabilidade complexa na**

**banda X.** 2007. Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - Universidade de Taubaté. Taubaté, SP. 2007.

PERMAFROST: NORTH AMERICAN CONTRIBUTION TO THE SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, **Building Research Advisory Board Staff**, National Academy of Sciences (U.S.), 1973.

PETROV, V.M.; GAGULIN, V.V. Microwave Absorbing Materials. **Inorganic Materials**. v.37, n. 2, p. 93-98, 2001.

PRATT, B.C., **US Patent** N° 2992452, 1961.

R & F Products, Microwave Absorbers. World Wide Web: [www.randf.com](http://www.randf.com) Acesso em 20 Jul 2014.

REZENDE, M. C.; O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, vol. 10, n.2, p. 4-10, 2000.

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

SAAB BARRACUDA. World Wide Web: [www.barracuda.se](http://www.barracuda.se) Acesso em 20 Jul 2014.

SAVILLE, P., HUBER, T., MAKEIFF, D., **Fabrication of Organic Radar Absorbing Materials** - A report on the TIF Project, Defence R&D Canadá – Atlantic, 2005-124.

SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, **Nanotecnologia - A ciência do pequeno em busca da maioria**, São Paulo, vol. 1, n.1, 2002.

SILVA, A.M.P., Instrumentação para produção e caracterização de filmes finos nanoestruturados, **Tese de Mestrado**, CBPF, 2002.

SLEMING, W. J. **An Introduction to Microwave Absorbent Materials**. Technical Reference from Plessey Materials, 1998.

SOETHE, V.L.; NOHARA, E. L.; FONTANA, L. C.; REZENDE, M. C. 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, 63-67, 2008.

SUN, D., MCGINNIS, D., Measurement and simulation results of Ti coated microwave absorber, **Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference**, New York, 1999.

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE. Quick Search. Search Patent. Disponível em: <<http://www.uspto.gov>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

WANG, T.; LI, T.; ZHAO, L.; HU, Z.; GU, Y. Research Progress on Nanostructured Radar Absorbing Materials. **Energy and Power Engineering**, 2011, 3, 580-584, Sep. 2011

## APÊNDICE A

No presente apêndice, são apresentadas as microscopias ópticas dos materiais compósitos estruturais atenuadores de radiação eletromagnética obtidos no presente trabalho.



Figura A.1. Configuração 1FC [5FV,1FF<sup>0nm</sup>]<sub>1</sub> 5FV.

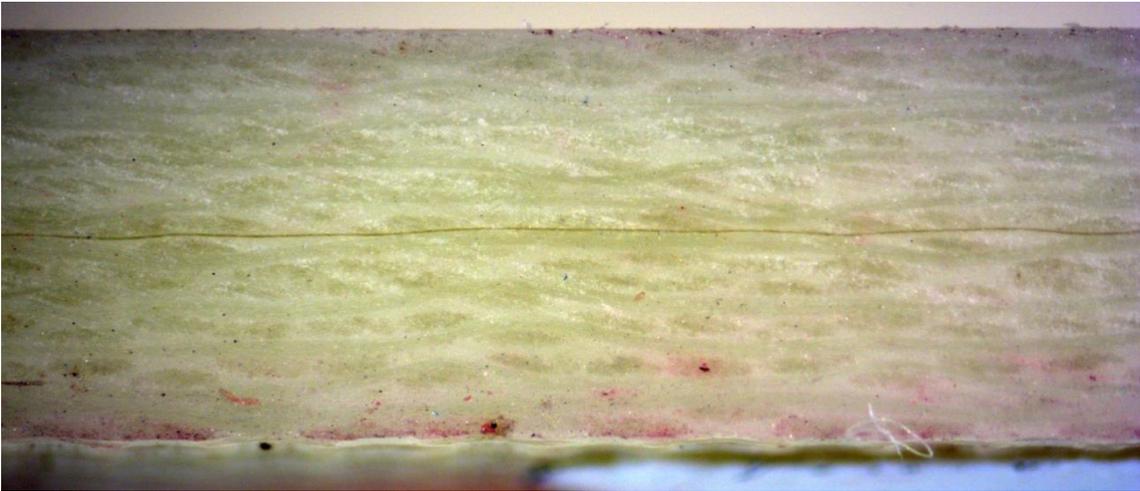


Figura A.2. Configuração 1FC [5FV,1FF<sup>5nm</sup>]<sub>1</sub> 5FV.



Figura A.3. Configuração 1FC [5FV,1FF<sup>10nm</sup>]<sub>1</sub> 5FV.

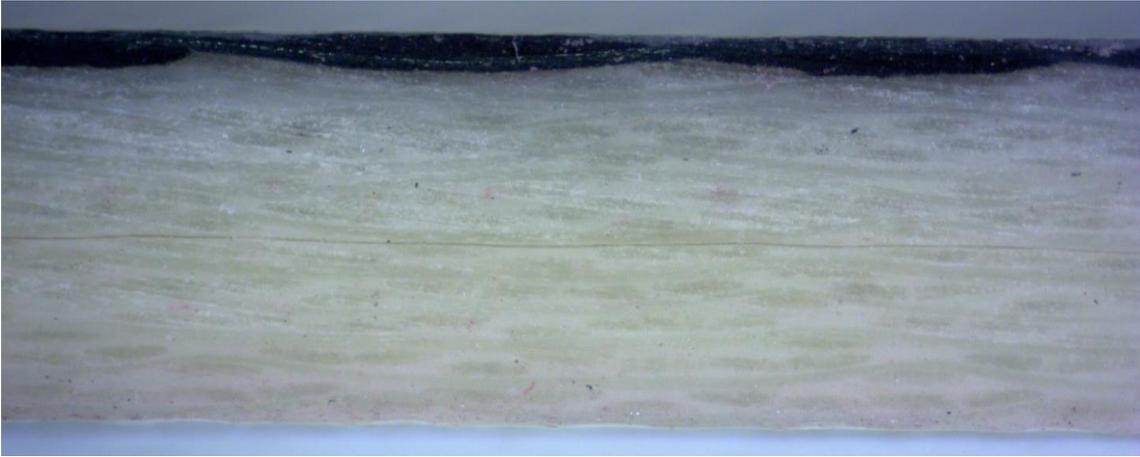


Figura A.4. Configuração 1FC [5FV,1FF<sup>15nm</sup>]<sub>1</sub> 5FV.

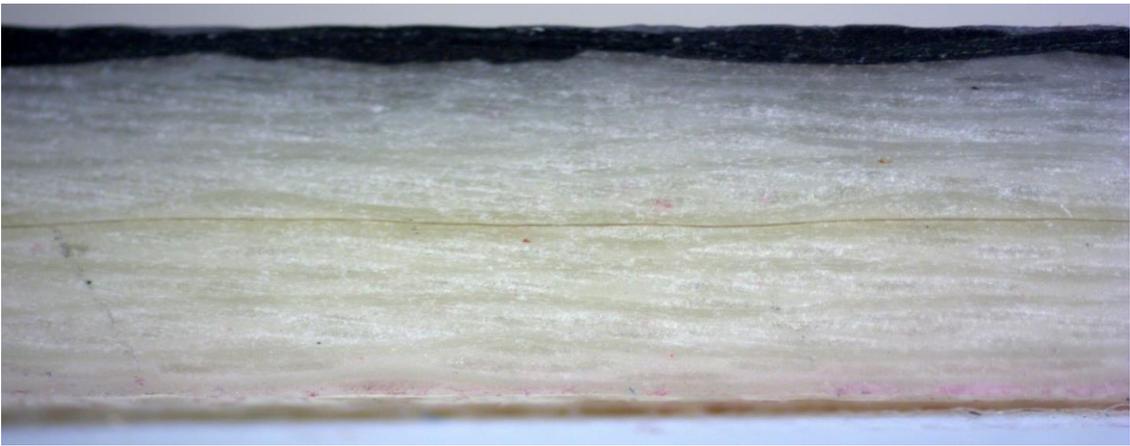


Figura A.5. Configuração 1FC [5FV,1FF<sup>20nm</sup>]<sub>1</sub> 5FV.

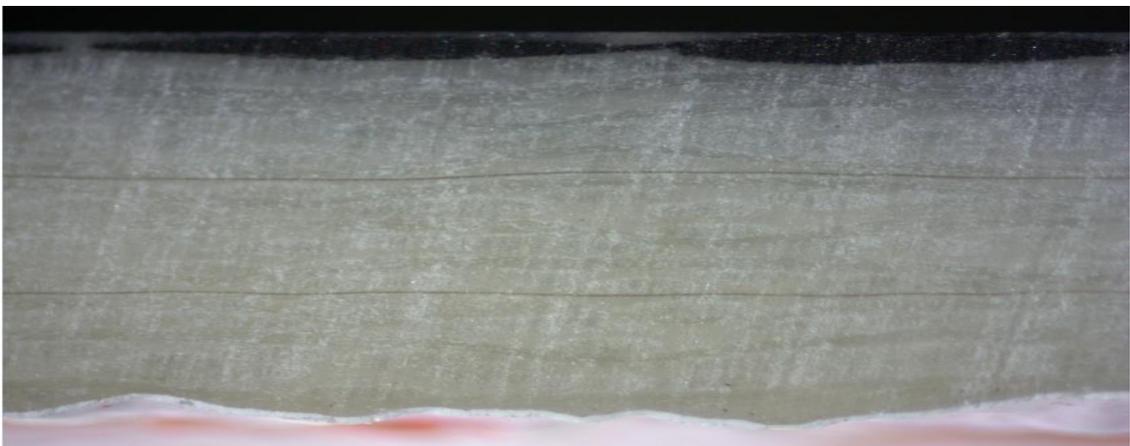


Figura A.6. Configuração 1FC [3FV,1FF<sup>0nm</sup>]<sub>2</sub> 3FV.



Figura A.7. Configuração 1FC [3FV,1FF<sup>5nm</sup>]<sub>2</sub> 3FV.

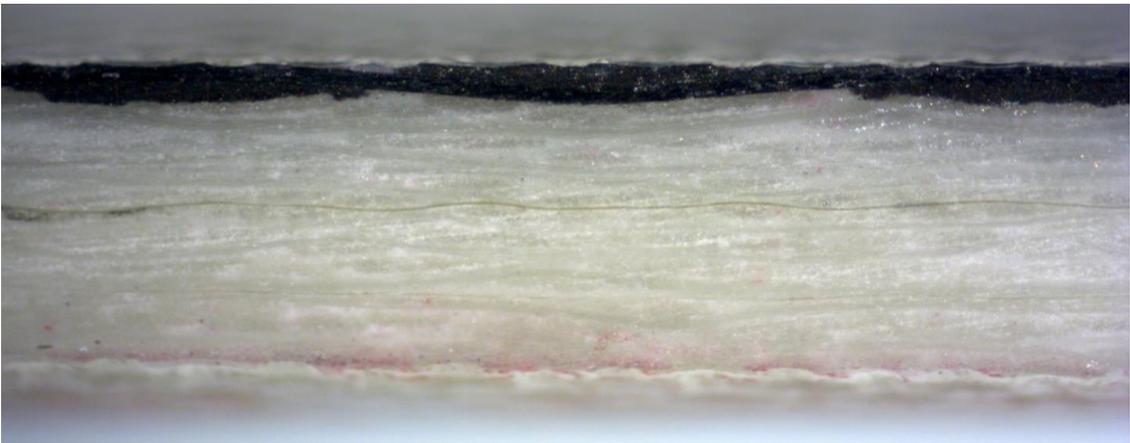


Figura A.8. Configuração 1FC [3FV,1FF<sup>10nm</sup>]<sub>2</sub> 3FV.

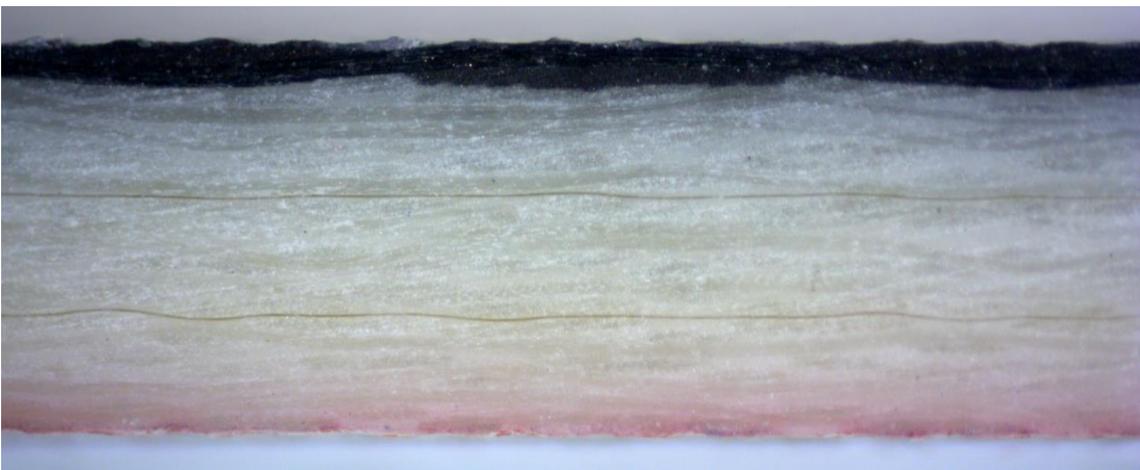


Figura A.9. Configuração 1FC [3FV,1FF<sup>15nm</sup>]<sub>2</sub> 3FV.

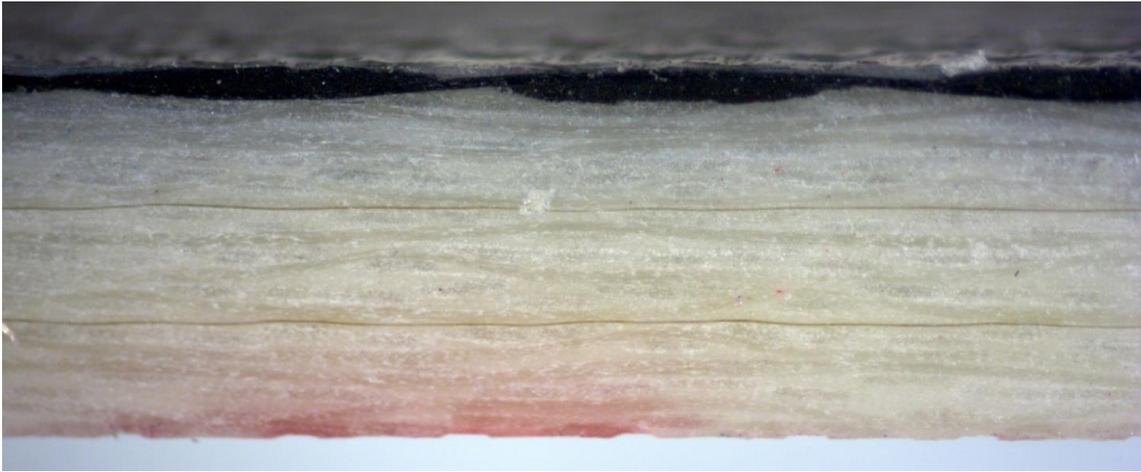


Figura A.10. Configuração 1FC [3FV,1FF<sup>20nm</sup>]<sub>2</sub> 3FV.

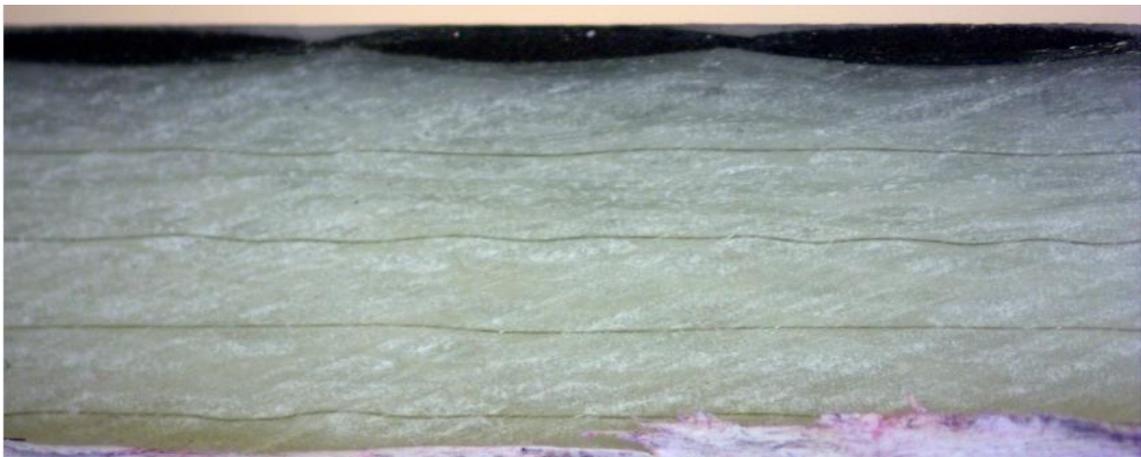


Figura A.11. Configuração 1FC [2FV,1FF<sup>0nm</sup>]<sub>4</sub> 2FV.

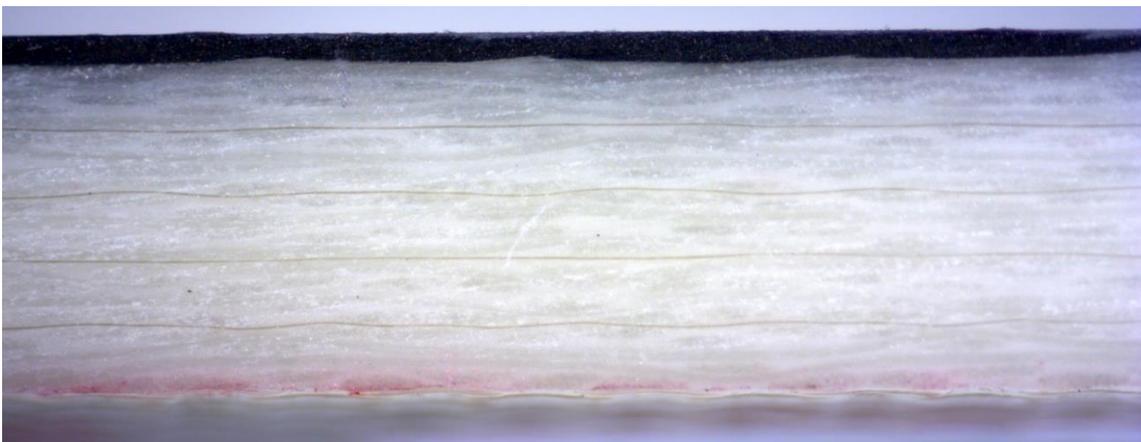


Figura A.12. Configuração 1FC [2FV,1FF<sup>5nm</sup>]<sub>4</sub> 2FV.

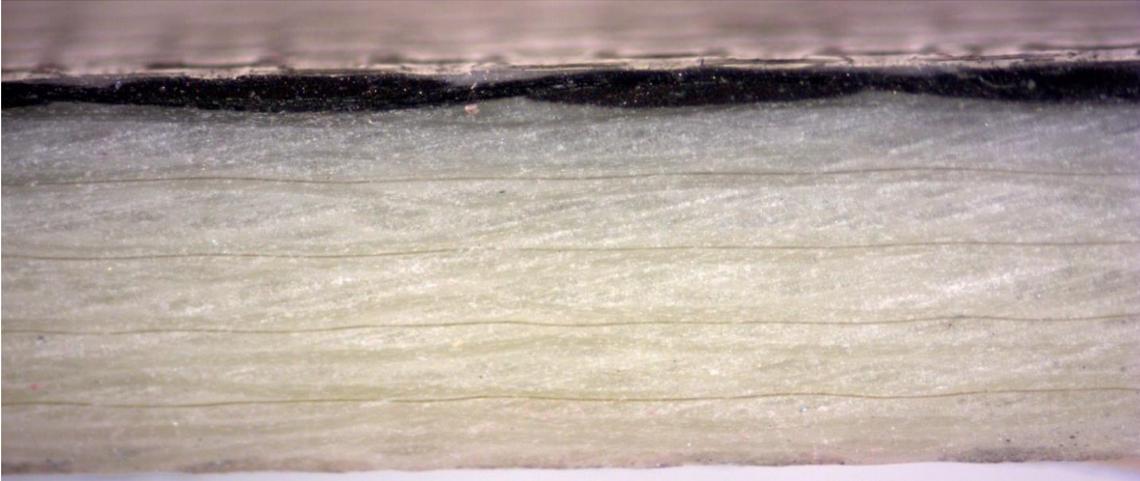


Figura A.13. Configuração 1FC [2FV,1FF<sup>10nm</sup>]<sub>4</sub> 2FV.

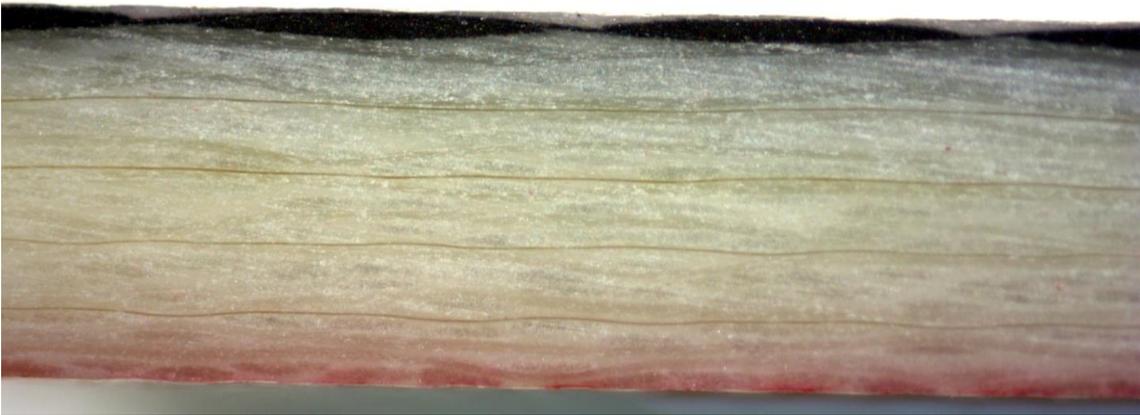


Figura A.14. Configuração 1FC [2FV,1FF<sup>15nm</sup>]<sub>4</sub> 2FV.



Figura A.15. Configuração 1FC [2FV,1FF<sup>20nm</sup>]<sub>4</sub> 2FV.