

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Guilherme Maldonado Costilhas e Matheus de Souza Leite

**ESTUDO DA OBTENÇÃO DE MATERIAIS
COMPÓSITOS ESTRUTURAIS
ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA**

Taubaté – SP

2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

Leite, Matheus de Souza

L533e Estudo da obtenção de materiais compósitos estruturais
absorvedores de radiação eletromagnética. / Matheus de
Souza Leite, Guilherme Maldonado Costilhas. - 2017.

45f. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) –
Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia
Mecânica e Elétrica, 2017

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara,
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.

Guilherme Maldonado Costilhas e Matheus de Souza Leite

**ESTUDO DA OBTENÇÃO DE MATERIAIS
COMPÓSITOS ESTRUTURAIS
ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Diploma do Curso de
Bacharelado em Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia da
Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

Taubaté – SP

2017

GUILHERME MALDONADO COSTILHAS E MATHEUS DE SOUZA LEITE

**ESTUDO DA OBTENÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS ESTRUTURAIS
ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Diploma do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

Data: 08 de dezembro de 2017

BANCA EXAMINADORA

Resultado: APROVADO

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara

Presidente da Banca – Orientador

Assinatura



Universidade de Taubaté

Prof. Dr. José Rubens Camargo

Membro da Banca

Assinatura



Universidade de Taubaté

Eu, Guilherme Costilhas, dedico este trabalho a toda minha família, em especial, aos meus pais e meu irmão que estão todos os dias ao meu lado me dando carinho e me ajudando a dar os certos passos para fazer as escolhas corretas para minha vida.

À minha namorada Rafaella Abifadel Abirached França e sua família por sempre me apoiar, me incentivar e acreditar em mim.

Ao meu Mestre Quebrinha e toda família Ginga Brasil por me darem grandes exemplos de humildade, raça e perseverança.

Finalmente, não menos importantes, aos meus amigos, meus irmãos da vida, que ajudaram a me tornar quem eu sou hoje.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.” –

Martin Luther King

“O importante não é a magnitude de nossas ações, mais sim a quantidade de amor que é colocada nelas.” –

Madre Teresa de Calcutá

“Eduque os meninos e não será preciso castigar os homens” - Pitágoras

“Amigos são a família que nos permitiram escolher” -

William Shakespeare

Eu, Matheus Leite, dedico este trabalho aos meus pais que sempre me incentivaram em minhas escolhas acadêmicas.

Dedico a minha namorada Mariana Giovana de Freitas por seu apoio e incentivo.

Finalmente, a todos meus amigos e familiares que proporcionaram que eu chegasse até aqui.

Os nossos pais amam-nos porque somos seus filhos, é um fato inalterável. Nos momentos de sucesso, isso pode parecer irrelevante, mas nas ocasiões de fracasso, oferecem um consolo e uma segurança que não se encontram em qualquer outro lugar.

(Bertrand Russell)

O amor faz-nos viver no futuro quando se é novo, no passado quando se é velho; e no céu durante um dia.

(Condessa Diane)

A cultura não se herda, conquista-se.

(André Malraux)

AGRADECIMENTOS

Eu, Guilherme Maldonado Costilhas agradeço

À Deus pelo dom da vida.

À Universidade de Taubaté (UNITAU) pela oportunidade da realização deste Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao meu orientador Professor Doutor Evandro Luís Nohara, por toda a confiança, atenção e orientação.

Aos meus pais e meu irmão que acreditaram em mim e me apoiaram durante todo o desenvolvimento da minha carreira universitária no Curso de Engenharia Mecânica.

Aos professores Antonio Carlos Tonini e Valesca Alvez Corrêa por me conceder bolsas nesta entidade desde o primeiro ano.

Ao meu amigo e parceiro deste trabalho Matheus de Souza Leite, por toda disposição e ajuda necessária para a realização deste feito.

Ao responsável pelo Laboratório CAD, Hilton Martins da Fonseca, por todas as conversas e ensinamentos.

Aos amigos que fiz durante todo o Curso, em especial, Caio Leone Teixeira Cardoso por estar ao meu lado durante todos os anos.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Eu, Matheus de Souza Leite agradeço

À UNITAU pela oportunidade da realização deste Curso de Graduação.

Ao meu orientador Professor Doutor Evandro Luís Nohara, por toda a atenção e ensinamentos nesta área fascinante.

Aos meus pais que tornaram possível a realização deste Curso de Engenharia Mecânica.

Ao meu parceiro deste trabalho e amigo Guilherme Maldonado Costilhas, por toda ajuda necessária para a realização deste feito.

A meu amigo Caio Leone Teixeira Cardoso por estar ao meu lado durante todos os anos deste curso.

Ao Professor Antonio Carlos Tonini por todos os ensinamentos e pela indicação a diretoria para ser bolsista como monitor na disciplina de Resistência dos Materiais por dois anos consecutivos.

RESUMO

Desde o início da civilização, os materiais são a ferramenta mais importante de um povo para se obter domínio sobre outro, isto fica comprovado recorrendo-se a história quando suas eras são divididas e recebem, respectivamente, os nomes dos materiais descobertos. Através dessa análise, no presente trabalho abordaremos, especificamente, os materiais absorvedores de radiação eletromagnética, conhecidos como MAREs. Esse tipo de material tem recebido enorme atenção devido ao aumento do controle, normatização e regulamentação dos níveis de radiação eletromagnética em todo o mundo, e também geram grande interesse na indústria de defesa, caracterizando-o com tecnologia *dual-use*.

Os MAREs são materiais compósitos, cujo objetivo principal é absorver radiação eletromagnética, convertendo-a em calor. Outra função destes materiais é de caráter estrutural, com intuito de incorporá-los as estruturas já existentes melhorando assim suas propriedades mecânicas. Um exemplo de aplicação para os MAREs na área civil são as tecnologias furtivas, tais como veículos militares aéreos, terrestres e marítimos, para baixar detecção de radares, devido a sua característica absorvedora de radiação eletromagnética, e pelo fato de ser um compósito, melhorar suas propriedades mecânicas mesmo com redução de peso. O presente trabalho tem como objetivo a fabricação de materiais compósitos estruturais absorvedores de radiação eletromagnética, compostos por tecidos de fibra de vidro e filmes finos absorvedores de radiação eletromagnética, avaliação mecânica dos compósitos obtidos, pelo ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar (ASTM D2344), microscopia óptica dos materiais obtidos e análise da região de fratura.

Após as análises, foi observado, através de um microscópio óptico, que em todos os compósitos foi encontrado um elevado grau de porosidade entre as camadas de fibra de vidro e filmes finos. Portanto, ficou concluído que em trabalhos futuros a montagem do material seja feita de forma diferente.

Palavras-chave: Materiais absorvedores de radiação eletromagnética, MARE, tecnologia *dual-use*, compósitos estruturais, fibra de vidro, fibra de carbono.

ABSTRACT

From the beginning of civilization, materials are the most important tool of one people to gain mastery over another, this is proven by resorting to history when their ages are divided and given, respectively, the names of the materials discovered. Through this analysis, in the present work we will specifically address the materials that absorb electromagnetic radiation, known as MAREs. This type of material has received enormous attention because of the increased control, standardization and regulation of electromagnetic radiation levels around the world, and also generate great interest in the defense industry, characterizing it with dual-use technology.

MAREs are composite materials, whose main purpose is to absorb electromagnetic radiation, converting it into heat. Another function of these materials is of a structural nature, in order to incorporate them into existing structures, thus improving their mechanical properties. An example of application to MAREs in the civilian area is the stealth technologies, such as military air vehicles, land and sea, to lower radar detection due to its electromagnetic radiation absorption characteristic, and because it is a composite, improve its mechanical properties even with weight reduction. The aim of this work is the fabrication of structural composite materials that absorb electromagnetic radiation, composed of glass fiber fabrics and fine films absorbing electromagnetic radiation, mechanical evaluation of the composites obtained by the interlaminar shear bond strength test (ASTM D2344). optical microscopy of the obtained materials and analysis of the fracture region.

After the analysis, it was observed, through an optical microscope, that in all composites a high degree of porosity was found between the layers of glass fiber and thin films. Therefore, it was concluded that in future work the assembly of the material is done differently.

Keywords: Electromagnetic radiation absorbing materials, MARE, dual-use technology, structural composites, fiberglass, carbon fiber.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações Iniciais	14
1.2 Justificativa e objetivos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Utilizações de Materiais Compósitos Avançados.....	20
2.2 – Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética (MARE)	23
2.3 Processo de Atenuação da Energia da Onda Eletromagnética por Filmes Finos	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 Fabricação do Material Compósito Absorvedor de Radiação Eletromagnética	28
3.2 Microscopia Óptica.....	31
3.3 Medição da espessura	32
3.4 Corte dos materiais	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5 CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Durante toda a existência da humanidade os materiais foram as principais ferramentas de um povo para obter domínio e desenvolvimento, isto fica comprovado recorrendo-se a história das civilizações que tem como marcos temporais nomes de materiais. Atualmente, na sociedade moderna, a principal ferramenta continua sendo o estudo dos materiais, que visa a obtenção de novas tecnologias em diversas áreas (GONÇALVES, 2015).

Nas últimas décadas, países desenvolvidos como EUA, Rússia, Alemanha, entre outros, investiram fortemente no desenvolvimento de novas tecnologias, e houve uma conseqüente evolução na área de materiais avançados, como os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética, também conhecidos como MAREs, uma tecnologia com pouca literatura divulgada devida a sua característica *dual-use*, ou seja, aplicações tanto na área civil quanto militar (ALEKSEIEV, et al, 2001).

Materiais avançados podem ser aplicados em diversas áreas, como atividades espaciais, defesa, eletrônica, energia, fotônica, indústria de construção civil, magnética, médico-odontológico, meio ambiente, recursos naturais minerais e biológicos, saúde e segurança pública. Na área civil pode-se destacar o uso em aparelhos eletrônicos que possuem compatibilidade eletromagnética, a qual envolve que o aparelho exercerá sua função requerida perto de outros dispositivos eletrônicos, e também não afetará o funcionamento de outros que igualmente possuam a tal compatibilidade. Todos os equipamentos que foram certificados como compatíveis eletromagneticamente possuem a sigla CE, geralmente localizada em sua parte posterior, como mostrado na Figura 1.1 (LEE, 1991).



Figura 1.1 – Par de caixas acústicas amplificadas com certificação de compatibilidade eletromagnética (M-AUDIO, 2017).

Parte dos problemas de CE é resolvida utilizando mares

Os mares são utilizados em aplicação civil e militar, na forma de mantas flexíveis, tintas e incorporados em compósitos estruturais

Há certo tempo, além do uso civil, alguns países desenvolvidos usam também compósitos avançados em partes estruturais de aeronaves furtivas, como a norte americana F-117 que possui baixa detecção por radares, podendo ser traqueada há uma distância de apenas 18 Km utilizando radares que operam na banda X, enquanto aeronaves comuns já podem ser traqueadas há cerca 100 Km (NOHARA, 2003).



Figura 1.2 – Caça furtivo F-117 (GONÇALVES, 2015).

Um sistema de defesa aérea baseado em solo dispõe de equipamentos com detecção de aeronaves através de radares que operam a frequências entre 3 MHz a 300 GHz que são divididas e nomeadas como bandas L, S, X e Ku. Desconsiderando algumas variáveis, como condições atmosféricas, ganho da antena, potência do sinal, tipo de relevo, vegetação, entre outros, os radares operantes na banda S podem ser capazes de detectar um alvo num raio de 400 Km, e os na banda X podem traquear seu alvo com alta precisão em torno de 90 Km. A Tabela 1.1 mostra as classificações em bandas e as relaciona com seus usos típicos (KNOTT, et al, 1985).

Tabela 1.1 – Faixa de frequência das bandas do espectro eletromagnético e uso geral.

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

Fonte: NOHARA (2003).

Geralmente, os radares de um sistema de vigilância e defesa anti-aérea, situados em solo funcionam nas bandas UHF, L, S, C ou X. Primeiramente realiza-se a varredura do espaço aéreo usando os radares operantes em banda UHF, L, S ou C, pois estes cobrem maiores distâncias. Posteriormente a detecção do alvo, é feito o traqueamento do mesmo em alta resolução utilizando a banda X, permitindo que se obtenha informações como altura, velocidade e azimuth, a partir dessas informações é possível abater o alvo (NOHARA, 2003).

Para evitar com que o míssil atinja seu objetivo então, é necessário fazer com que o alvo se torne difícil de ser traqueado. Em todas as fases da operação de

defesa existe uma distância crítica, ou seja, os radares não conseguem mais obter com precisão a localização do alvo.

Em 1995, os EUA fizeram uma série experimentos com mísseis equipados com radares de alta precisão no traqueamento de alvos móveis. Foram disparados cerca de 80 mísseis e 70 deles atingiram seus objetivos. O motivo do fracasso dos outros 10 mísseis foram a baixa seção reta radar, também chamada de *Radar Cross Section* (RCS), dos mesmos. A análise dos resultados concluiu que o valor limite para que os radares detectassem os alvos era uma seção reta radar de 1m^2 (ZMUROV, 2002).

A RCS tem sua unidade de medida em metros quadrados, porém está intimamente ligada a potência refletida de um alvo e não com sua área propriamente dita. A equação para determinação da seção reta radar é proporcional a multiplicação dos quadrados dos lados do alvo e indiretamente proporcional ao comprimento da onda eletromagnética ao quadrado, então ficará definida conforme equação 1, onde a e b são as dimensões da placa e λ o comprimento da onda (KNOTT, et al,1985).

$$\sigma = (4\pi a^2 b^2) / \lambda^2 \quad (1)$$

Pela Equação (1) é possível determinar que uma placa com dimensões de 0,097 m x 0,097m a 9,0 GHz, possui uma RCS igual a 1,0 m², o menor valor detectável para os radares mais sofisticados, e atualmente há pesquisas sobre como tornar a seção reta radar dos alvos inferior ao valor limite detectável. Por meio de pesquisas, foi observado que a aplicação de um material compósito avançado absorvedor de radiação eletromagnética na superfície dos alvos de maneira específica, era possível reduzir a RCS dos mesmos (ZMUROV, 2002).

1.2 Justificativa e objetivos

Devido aos materiais absorvedores de radiação eletromagnética serem classificados como *dual-use*, isto é, com aplicação na área civil e militar, há uma grande escassez de literaturas aprofundadas publicadas acerca desse tema, limitando se apenas a divulgações genéricas e sobre potencial de tais compósitos. Reconhecendo-se a importância deste tipo de material para a nação, o trabalho tem como objetivos:

- Estudo da fabricação de um compósito estrutural avançado híbrido, obtido através da laminação de filmes finos do polímero PET (poli tereftalato de etileno) intercalados com tecidos pré-impregnados de fibras de vidro e matriz epóxi, com diversas arquiteturas, ou seja, diferentes quantidades de filme fino de PET e tecido de fibra de vidro.
- Consolidação dos compósitos via processamento com saco de vácuo e autoclave.
- Microscopia óptica dos compósitos obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Utilizações de Materiais Compósitos Avançados

Atualmente, estão entre as principais aplicações de materiais compósitos avançados nas áreas de: atividades espaciais, defesa, eletrônica, energia, fotônica, indústria de construção civil, magnética, médico-odontológico, meio ambiente, recursos naturais biológicos e minerais, saúde e segurança pública. Inicialmente na área de atividade espacial e aeronáutica, o uso desses compósitos estava ligado à produção de aeronaves *stealth* (invisíveis ou de baixa detecção ao radar) do setor militar (GAMA, 2011) e (NOHARA, 2003), como a aeronave bombardeiro B-2, apresentado na Figura 2.1 (ref).



Figura 2.1 – Aeronave furtiva B-2 ref, 2003).

Hoje em dia, montadoras de aeronaves para uso civil, também investem na utilização de materiais compósitos avançados para integrar partes estruturais, reduzindo assim o seu peso entre 20 a 30%, além da redução em cerca de 25% do seu custo final, com melhora da resistência mecânica de suas partes (GONÇALVES, 2015) e (RESENDE, 2000).

Estima-se que a tendência de crescimento do uso de materiais compósitos poliméricos no futuro seja em torno 5% ao ano, porcentagem essa que pode ser até

incrementada, visto que no Brasil em 2013 o aumento foi de cerca de 9%, e mesmo diante da crise em 2014 o aumento foi de 5%. Esse percentual de crescimento é grande parte devido a indústria automotiva que incorpora cada vez mais materiais compósitos a seus veículos, e não se pode deixar de lado o uso também crescente no mercado agrícola, construção civil e energia eólica (GONÇALVES, 2015). A Figura 2.2 representa um carro-conceito de baixo peso.

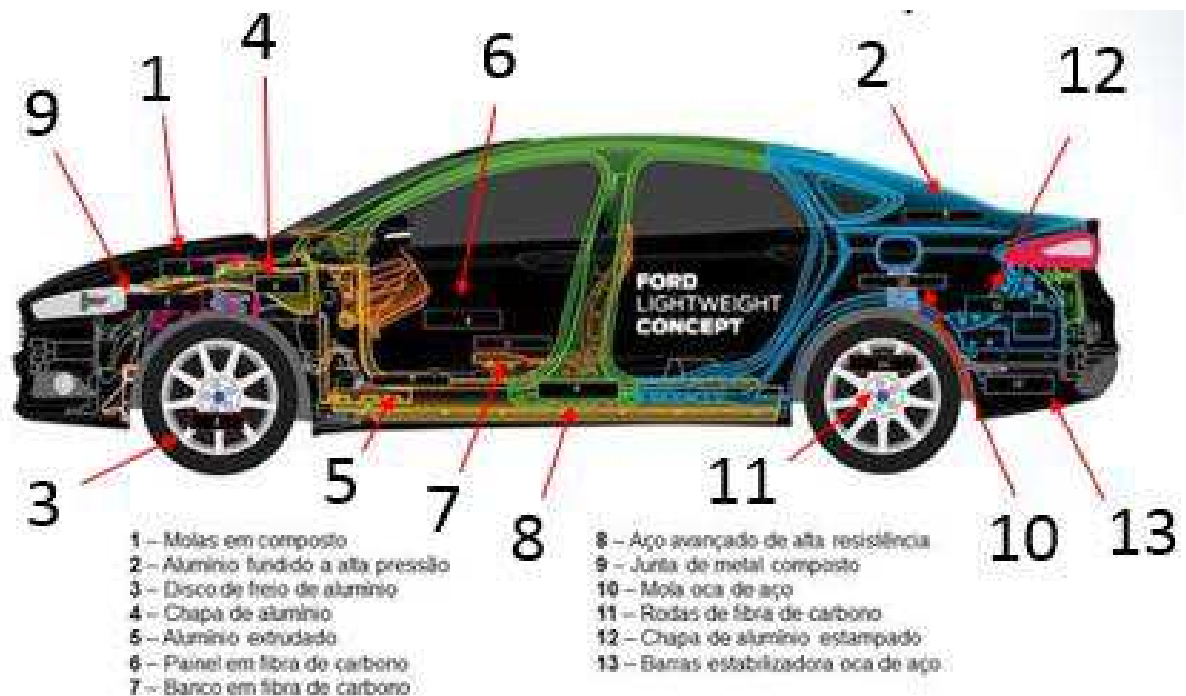


Figura 2.2 – Carro-conceito de baixo peso (TECMUNDO, 2014).

Agora quando se leva em conta em nível mundial, o mercado dos compósitos aumentou pouco mais 9% em 2012 e sua estimativa para a taxa média de crescimento anual para os anos compreendidos entre 2013 a 2018 gira em torno de 7% (ALMACO, 2015) e (COMPOSITES WORLD, 2014).

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética são um tipo de compósito, e assim chamados por disporem de características que lhes proporcionam conversão de energia de radiação eletromagnética que neles incide por calor. Esses materiais podem ser classificados em 2 tipos, que dependem do tipo de interação que o MARE tem com as ondas eletromagnéticas. Se o material interage com o campo elétrico das ondas, este é denominado como MARE com perdas dielétricas, e quando interage com o campo magnético é denominado MARE com perdas magnéticas (KIM, 2007; CHUNG, 2003).

Apesar de serem classificados em dois tipos, ambos fazem a mesma conversão de energia de radiação eletromagnética em calor. Essa conversão está ligada a um fenômeno chamado de ressonância, termo empregado para denominar faixas de frequências onde o material é capaz de absorver a energia de uma onda.

Os MAREs são muito utilizados em tecnologias furtivas, visto que um material com capacidade de absorção de ondas eletromagnéticas, quando incorporados de maneira específica a tais tecnologias, tem a característica de reduzir a detecção das mesmas a radares (MIACCI, 2012) e (DEFENSE INDUSTRY DAILY, 2014). Abaixo uma plataforma marítima americana construída para ter baixa assinatura radar, intitulada como M-80 *Stilleto* mostrada na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Plataforma M-80 *Stilleto* (NOHARA, 2003).

Com o crescente uso de radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas em diversas áreas, surgiu a necessidade de um controle para determinar os níveis aceitáveis de radiação dos aparelhos, para que pudessem exercer suas funções requeridas mesmo próximos de outros equipamentos eletrônicos. Essa condição é denominada como Compatibilidade Eletromagnética, onde parte do controle do nível de radiação eletromagnética é solucionado pela utilização dos materiais absorvedores de radiação eletromagnética (KAMCHI, 2013).

Uma parcela dos componentes eletrônicos tem seu funcionamento baseado na emissão e leitura de ondas eletromagnéticas, torna-se então conveniente que esses aparelhos estejam blindados para que outras ondas não interfiram na sua leitura, prejudicando seu funcionamento. O isolamento pode ser obtido pelo emprego de câmaras metálicas, onde o componente a ser isolado é blindado do meio externo, ou absorção da radiação eletromagnética, pelo emprego de MARE.

2.2 – Material Absorvedor de Radiação Eletromagnética (MARE)

De maneira simples, pode-se dizer que esses materiais possuem a capacidade de absorver parte da energia da onda eletromagnética por meio de mecanismos próprios de perdas, transformando-a em calor (KIM, 2007) e (CHUNG, 2003). Quando o material interage com o campo magnético da onda, é dito material com perdas magnéticas, como é o caso de ferritas. Já materiais que interagem com o campo elétrico são ditos materiais com perdas dielétricas, podendo citar materiais a base de carbono, como negro de fumo, ferritas (óxidos cerâmicos), polímeros condutores e filmes finos metálicos.

Os MAREs, com perdas dielétricas possuem valores pequenos de permissividade real (ϵ') e altas perdas (ϵ''), através da interação da onda incidente com os elétrons situados na estrutura do material. Por outro lado, perdas magnéticas, apresentam valores superiores a 1 para a componente elétrica (ϵ) e também para a magnética (μ), portanto, possuem tanto perdas dielétricas quanto magnéticas (NOHARA, 2012).

Porem cada tipo de material possuem suas vantagens e desvantagens, no caso de material com perdas magnéticas, sua vantagem é dimensão reduzida quando comparados com os MARE dielétricos como o negro de fumo que são necessários centímetros para uma atenuação por volta de 50% fumo (NIE, 2007; PETROV, 2001; FANG, 2007; R & F PRODUCTS, 2014; SAAB BARRACUDA, 2014; KV MICROWAVE MATERIALS, 2014; EMMERSON & CUMMING, 2014). Já os filmes finos, devido aos processos quânticos na interação da onda com a estrutura eletrônica do material do filme, permitem que a atenuação ocorra com espessuras de recobrimento na casa de nanômetros (BHAT, 1998).

Os materiais absorvedores se destacam tanto no setor civil quanto militar para blindagem eletromagnética de automóveis, aeronaves, equipamentos militares e

domésticos. O desenvolvimento desses materiais é parte do fundamental para o progresso da engenharia de antenas e blindagens eletromagnéticas de ondas que vão desde milímetros até metros, devido a diferentes aplicações (NIE, 2007; BREGAR, 2004; REZENDE, 2000; LEE, 1991; JOHNSON, 1986; EMERSON, 1973; SLEMING, 1998; HASHISH, 2002). Existem uma classificação usual para dois tipos de absorvedores, banda estreita, tipo N (*Narrow*) e banda larga, tipo W (*Wide*). Os materiais do tipo N, geram interferência entre as ondas de faixa estreita incidentes e refletidas (REZENDE, 2000). Por outro lado, o tipo W, absorve uma banda larga de frequências, permitindo-lhe ser empregada em diversas aplicações, como revestimento de câmaras anecóicas e artefatos aeroespaciais localizados em seções de radar que trabalham em uma frequência, por exemplo, de 8 a 12 GHz (FANG, 2007) e (R & F PRODUCTS, 2014).

. Os MAREs começaram a serem desenvolvidos em laboratório pouco tempo antes da segunda guerra mundial. Desde então, autores vem divulgando trabalhos sobre processos de obtenção e desenvolvimento dos mesmos (REZENDE, 2000). Porém a literatura desses materiais de interesse estratégico é escassa, principalmente a respeito de filmes finos metálicos. Eles são citados apenas no desenvolvimento de estruturas em conjunto com camadas de polímeros ou borrachas aditadas. Algumas publicações de patentes chegam a citar a utilização de materiais absorvedores com multicamadas, descrevendo mudanças em sua estrutura com intuito de aumentar a absorção de uma única camada de filme fino (ABDELAZIZ, 2008).

Existe uma patente em que fala sobre filmes finos de alumínio, depositados através de evaporação, são utilizados como materiais condutores em meio a estrutura com multicamadas, intercalada com acrílico ou plástico. Esse tipo de estrutura teve o intuito de aumentar condutividade e a espessura desse recobrimento, promovendo absorção na faixa de 8 a 18 GHz (TUSCH, 1993).

2.3 Processo de Atenuação da Energia da Onda Eletromagnética por Filmes Finos

Quando uma aplicação tem espessuras menores que a da camada pelicular, a onda incidente sobre uma determinada superfície irá penetrar na mesma, gerando correntes de *Eddy* na superfície. Ao surgirem estas correntes, o material poderá transformar a energia da onda incidente em calor, reduzindo assim o índice de reflexão.

Filmes finos metálicos depositados sobre materiais poliméricos possuem propriedades de atenuação diretamente relacionada com a condutividade e espessura do mesmo. Existe uma patente norte americana PI6986942 (MAYES, 2006), a mesma cita que metais são como espelhos para ondas eletromagnéticas incidentes, pois o objetivo da superfície é se manter com o campo elétrico igual a zero (ISHII, 2004; MAYES, 2006).

Porém, quando se reduz a espessura da superfície, para medidas menores que a profundidade necessária para penetração da onda no material, em uma determinada frequência, isso gera correntes elétricas em seu interior, correntes *Eddy*. E, como já citado, essas correntes quando penetram no material, atenuam os campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética, reduzindo seu valor em uma taxa de 0,36 até a espessura de camada limite.

Existem outras patentes que citam que é necessárias espessuras inferiores ao do valor necessário para penetração da onda de acordo com a norte americana. PI10035896 (FUJIEDA, 2005; PERMAFROST, 1973). Do mesmo modo, a patente PI16823816 (ISHI, 2004), também cita que para um campo magnético ou elétrico possa penetrar em uma superfície metálica é fundamental levar-se em consideração que para maiores frequências são necessárias maiores profundidades de penetração da onda, desta forma pode se ajustar a espessura do material com o intuito de efetuar processos de atenuação da radiação naquela faixa de frequência (ISHII, 2004) e (JANOS, 1994).

Durante o processo de atenuação da energia, é preciso que ocorra pontos de espalhamento de elétrons, de maneira a converter a energia cinética dos mesmos em energia térmica através do efeito Joule. Portanto, a existência de defeitos ou

descontinuidades no filme auxilia este espalhamento, gerando assim uma maior atenuação da energia da onda que incide sobre o material.

Está sendo demonstrado através de estudos sobre a teoria da profundidade de penetração de ondas em filmes finos, que a diminuição da espessura de recobrimento, gera decréscimo na condutividade da estrutura, como se observa na figura 2.4. Então, se esta propriedade é diretamente ligada ao processo de deposição, como taxa de deposição, mistura do gás, pureza e energia cinética das partículas evaporadas (SUN, 1999).

Portanto, é possível verificar que filmes finos com espessuras na faixa de profundidade de onda, ou menores, geram condutividades menores que materiais robustos, pois ela aumenta a possibilidade de o material possuir descontinuidades em sua estrutura. A estrutura então, irá se apresentar como um meio resistivo as correntes de *Eddy* induzidas na superfície, o que favorece a conversão da energia cinética dos elétrons em energia térmica, diminuindo assim, a energia refletida ao detector.

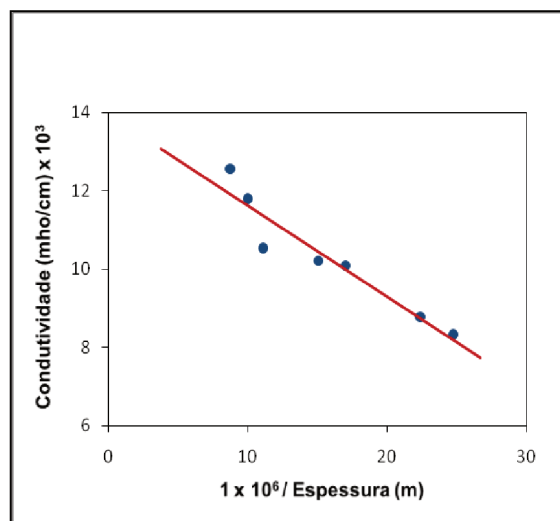


Figura 2.4 Gráfico entre espessura do recobrimento e a condutividade apresentada do material analisado (BHAT, 1998).

Pode-se mencionar um problema que ocorreu durante experimentos empregando-se filmes finos metálicos em janelas de micro-ondas, as mesmas sofreram uma metalização inesperada por um material contaminante, promovendo

um aquecimento local demasiado devido a absorção da radiação eletromagnética, gerando o rompimento das janelas. Observou-se então, que filmes extremamente finos possuem condutividades inferiores, portanto a resistência equivalente, para os mesmos, é elevada. Isto implica numa maior conversão da energia de radiação em energia térmica pelo efeito Joule, o qual foi responsável pelo rompimento das janelas (BOSMAN, 2003), (BOSMAN, 2004).

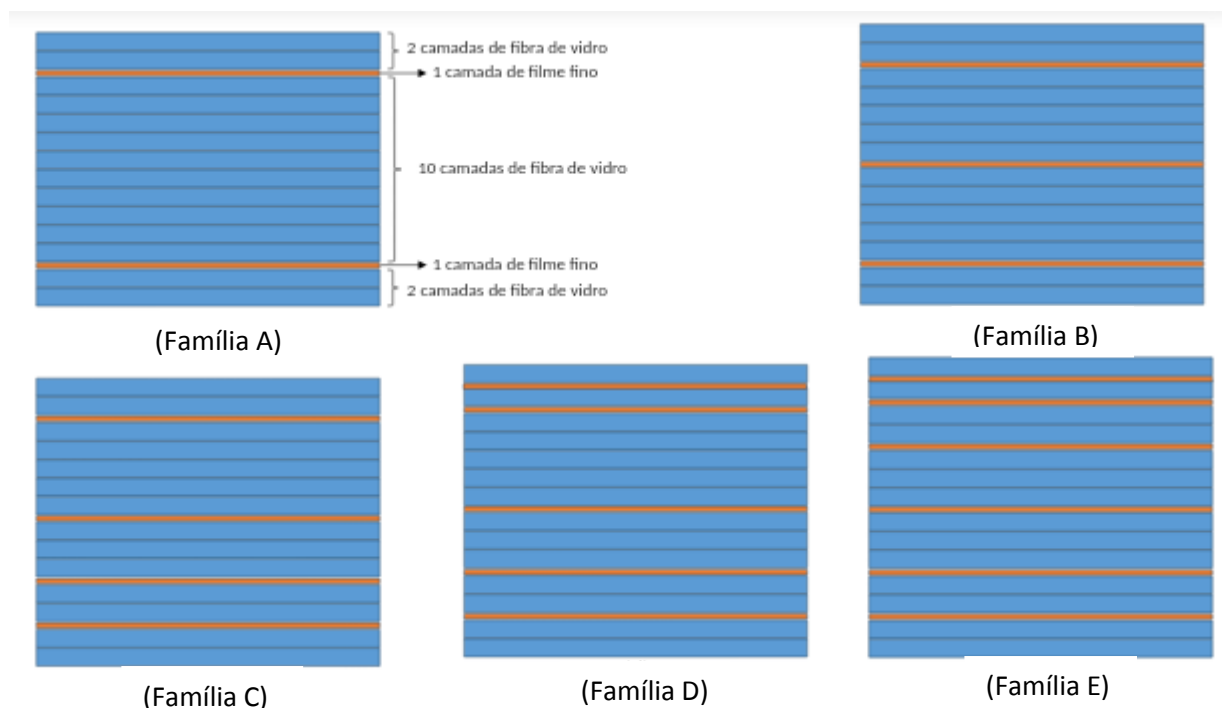
3 MATERIAIS E MÉTODOS

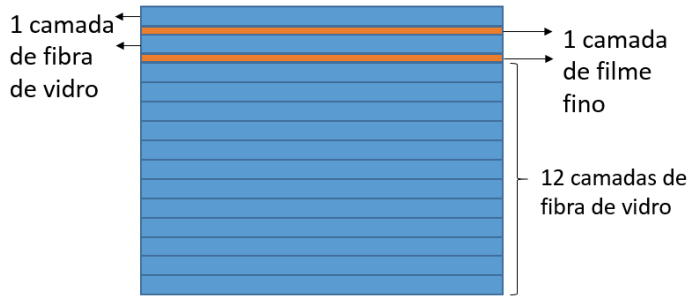
O processo experimental do trabalho foi baseado numa sequência de passos, descritas no item 1.2 – Justificativa e Objetivos, o qual envolve:

- Estudo da fabricação de um compósito estrutural avançado híbrido, obtido através da laminação de filmes finos do polímero PET (poli tereftalato de etileno) intercalados com tecidos pré-impregnados de fibras de vidro e matriz epóxi, com diversas arquiteturas, ou seja, diferentes quantidades de filme fino de PET e tecido de fibra de vidro.
- Consolidação dos compósitos via processamento com saco de vácuo e autoclave.
- Microscopia óptica dos compósitos obtidos.

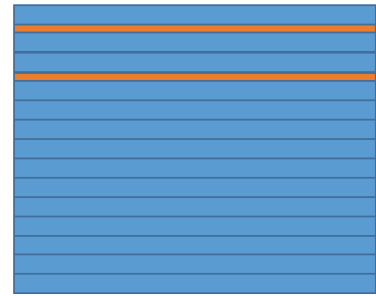
3.1 Fabricação do Material Compósito Absorvedor de Radiação Eletromagnética

Os materiais compósitos absorvedores de radiação foram fabricados com a utilização de tecido de fibras de vidro pré-impregnado com resina epóxi, intercalados com filmes do polímero PET (poli tereftalato de etileno) de espessura igual a 0,08 mm, em 25 diferentes famílias, mostradas na figura 3.2. Todos os compósitos obtidos foram processados via autoclave e saco de vácuo.

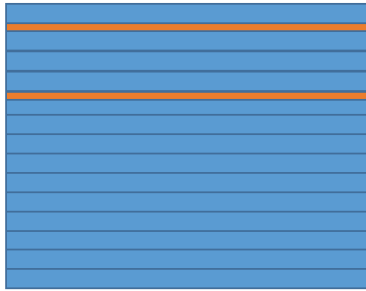




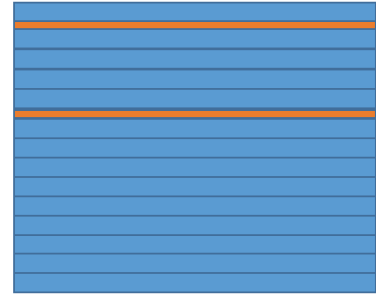
(Família A.1)



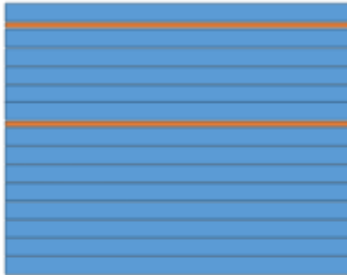
(Família A.2)



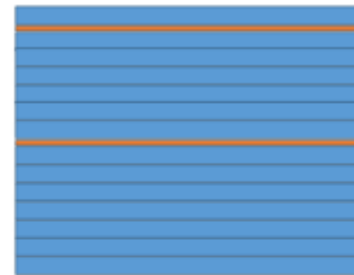
(Família A.3)



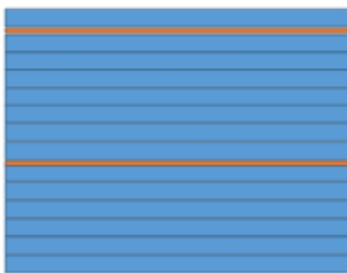
(Família A.4)



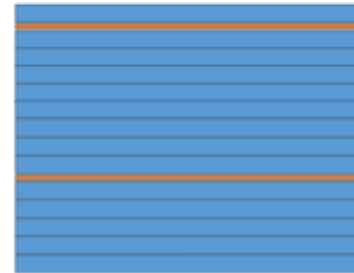
(Família A.5)



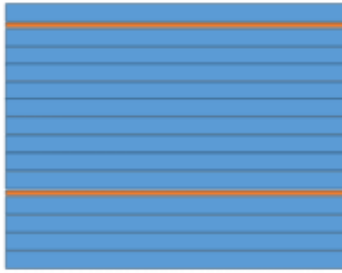
(Família A.6)



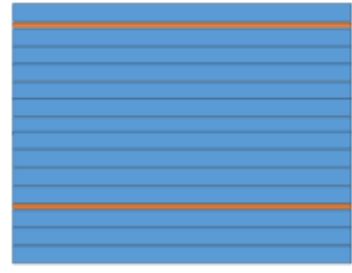
(Família A.7)



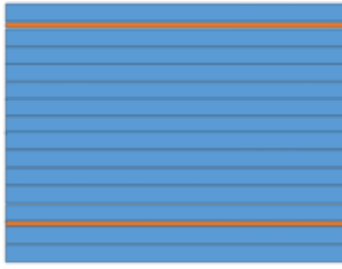
(Família A.8)



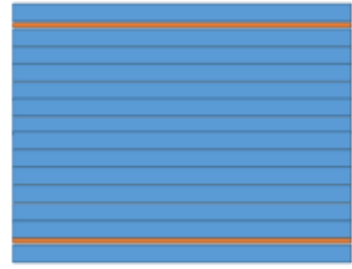
(Familia A.9)



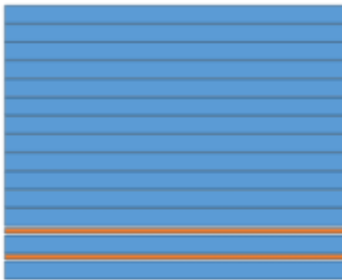
(Familia A.10)



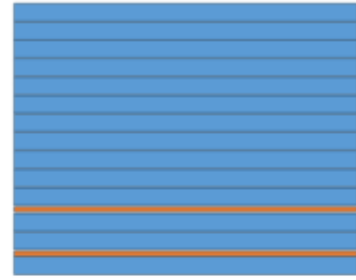
(Familia A.11)



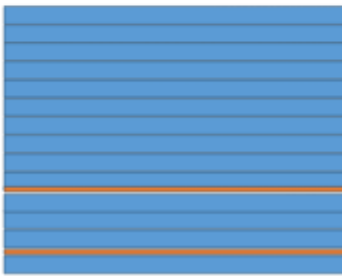
(Familia A.12)



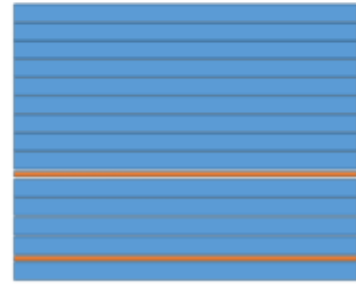
(Familia A.13)



(Familia A.14)



(Familia A.15)



(Familia A.16)

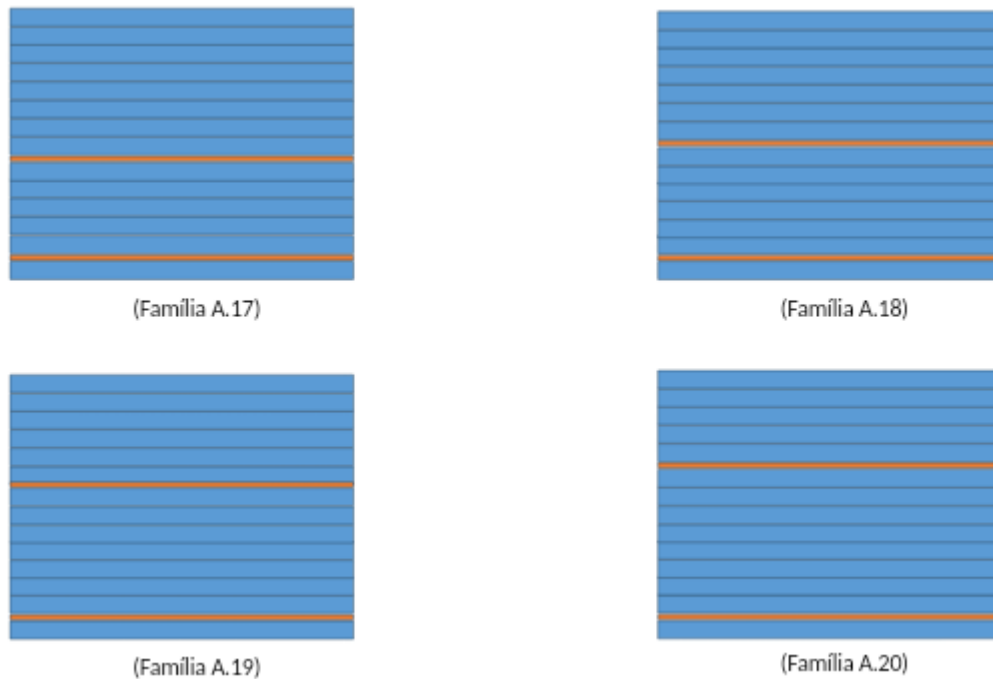
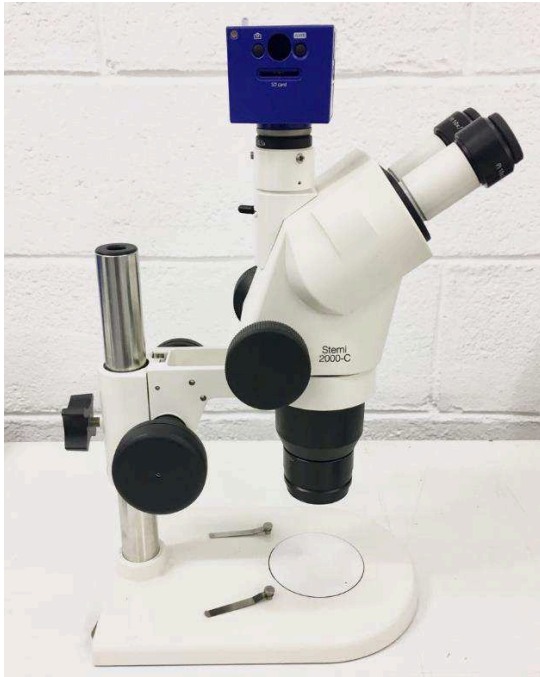


Figura 3.2 Representação das estruturas obtidas através de laminas de fibra de vidro e filmes finos atenuadores de radiação eletromagnética (LAB. UNITAU, 2017).

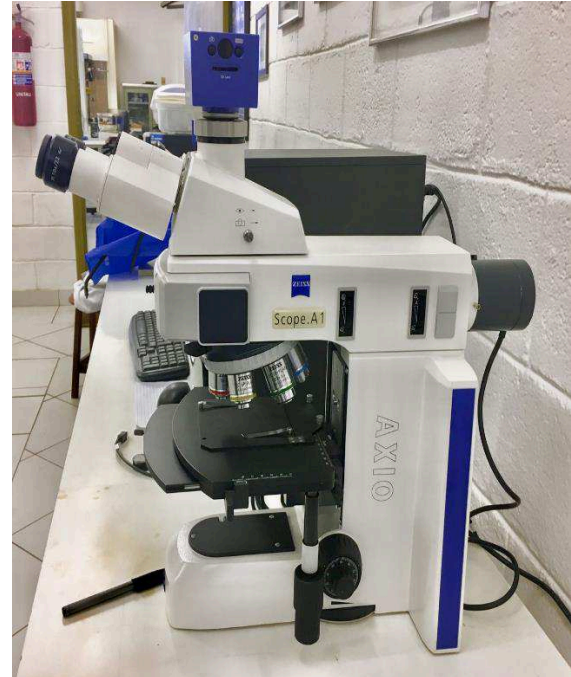
3.2 Microscopia Óptica

No Laboratório de Materiais e Ensaio do Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU foi realizada a microscopia óptica dos materiais compósitos obtidos, para analisar a seção transversal do compósito. Os microscópios utilizados estão mostrados na Figura 3.3, descritos abaixo.

- 1) Microscópio estereoscópio, marca Zeiss, Stemi 2000-C, equipado com uma câmera digital de 5 MP modelo AxioCAM ERc5s, conectado a um computador tipo PC para aquisição e tratamento de imagens.
- 2) Microscópio óptico, marca Zeiss, Scope.A1 AXIO, equipado com uma câmera digital de 5 MP modelo AxioCAM ERc5s, conectado a um computador tipo PC para aquisição e tratamento de imagens.



(a)



(b)

Figura 3.3. (a) Microscópio Estereoscópio Zeiss modelo Stemi 2000-C. (b) Microscópio óptico Zeiss modelo Scope.A1 AXIO (LAB. UNITAU, 2017).

3.3 Medição da espessura

A espessura de todos os compósitos obtidos foi medida com um micrometro centesimal da marca Feinmes Szeugfabriik – Suhl, com capacidade de medida entre 0-25 mm, e resolução de 0,001 mm (1 μ m).

3.4 Corte dos materiais

Os compósitos foram cortados com uma serra manual (Starrett), e uma máquina de corte com disco diamantado, marca Struers, modelo Accutom 5, mostrado na Figura 3.4.



(a)



(b)

Figura 3.3. (a) Máquina de corte com disco diamantado, modelo Accutom 5. (b) Serra manual (Starrett) (LAB. UNITAU, 2017).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 mostra a espessura medida dos compósitos obtidos após processamento com saco de vácuo e auto-clave, a quantidade de camadas de PET e tecido pré-impregnado, medida com um micrometro. Nas famílias A, B, C, D e E pode-se observar que há um aumento progressivo da espessura, em passos de aproximadamente 1,000 mm. Isto se deve a uma quantidade fixa de tecido de fibras de vidro pré-impregnado, com aumento de uma unidade de filme de PET com 0,080 mm de espessura. A família A e famílias de A.1 até A.20 possuem a mesma espessura, uma vez que possuem a mesma quantidade de tecido de fibras de vidro pré-impregnado e 2 filmes de PET. Os dados de espessura obtidos mostram que os compósitos foram adequadamente processados em número de camadas.

Tabela 1. Espessura dos compósitos obtidos, quantidade de camadas de tecido de fibras de vidro e quantidade de filmes de PET.

Família	Quantidade de camadas de tecido de fibras de vidro pré-impregnado	Quantidade de filmes de PET	Espessura (mm)
A	14	2	3,400
B	14	3	3,480
C	14	4	3,580
D	14	5	3,720
E	14	6	3,800
A.1 - A.20	14	2	3,400

Todos as famílias de compósitos processados via saco de vácuo e auto-clave não apresentaram delaminação após finalizada a cura, o que mostra que a inserção do filme de PET entre as camadas de prepreg de fibra de vidro permitiu a consolidação dos compósitos. Entretanto, quando as famílias foram cortadas para obtenção dos corpos-de-prova de microscopia via serra manual, houve delaminação visível na estrutura do compósito, como mostrado na Figura 4.2. Essa delaminação é atribuída ao descolamento da camada de filme de PET com a camada de tecido de fibra de vidro. Este procedimento foi realizado em 5 amostras e todas

apresentaram delaminação. Dessa maneira, optou-se por continuar o corte das amostras com uma máquina de corte com disco de serra diamantado, com rotação de 3000 rpm, uma vez que o corte em baixas frequências, como encontrado em serras manuais, acaba por danificar o compósito. A Figura 4.3 mostra a fotografia de um compósito após corte com a máquina de corte, onde não há presença de regiões com delaminação.

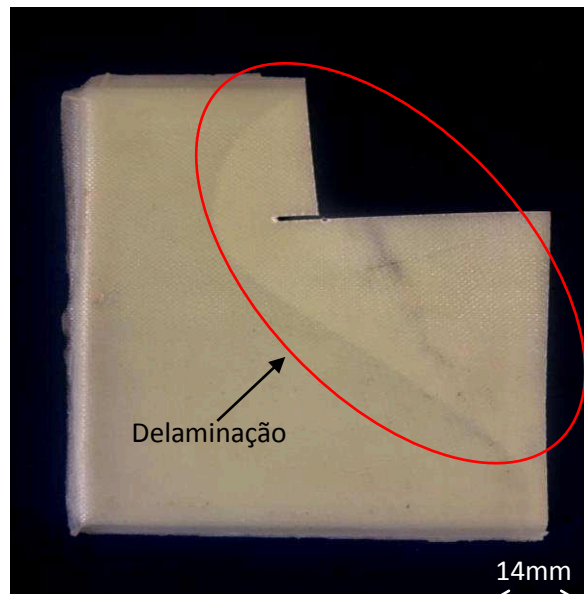


Figura 4.2 – Compósito com delaminação visível entre as camadas de fibra de vidro e filme plástico, após corte com serra manual (LAB. UNITAU, 2017).

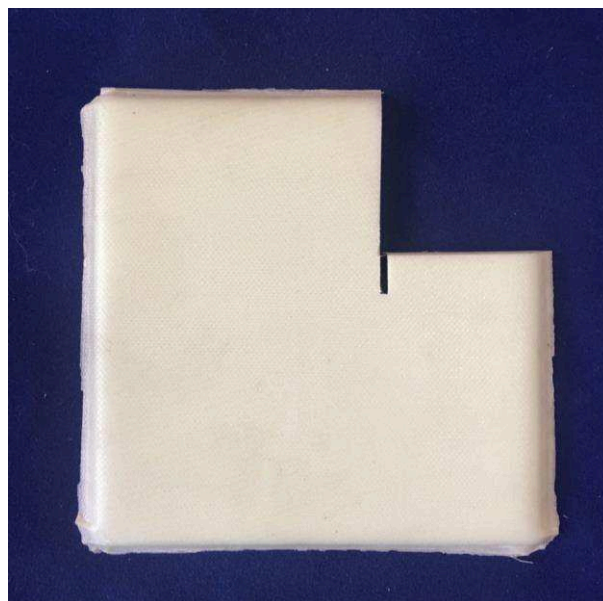
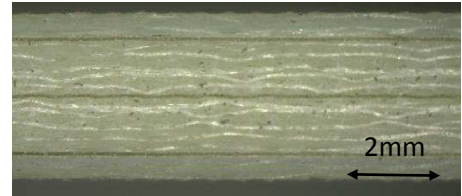


Figura 4.3 – Compósito sem delaminação entre as camadas de fibra de vidro e filme plástico, após corte com máquina de corte com disco de serra diamantado (LAB. UNITAU, 2017).

A Figura 4.3 mostra a macrografia da seção transversal de todas as famílias obtidas de compósitos. Pode-se observar que ocorreu uma boa consolidação entre as camadas de tecido de fibra de vidro/resina epóxi e os filmes de PET, para todas as famílias apresentadas.



Família A



Família B



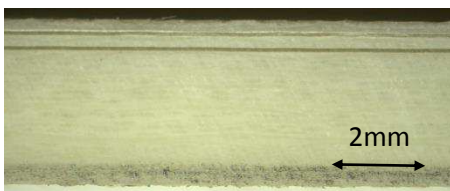
Família C



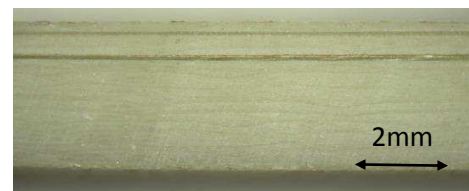
Família D



Família E



Família A.1



Família A.2



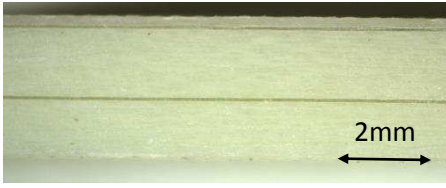
Família A.3



Família A.4



Família A.5



Família A.6



Família A.7



Família A.8



Família A.9



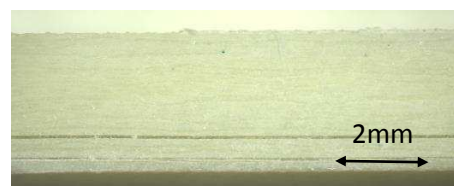
Família A.10



Família A.11



Família A.12



Família A.13



Família A.14



Família A.15



Família A.16



Família A.17

Família A.18

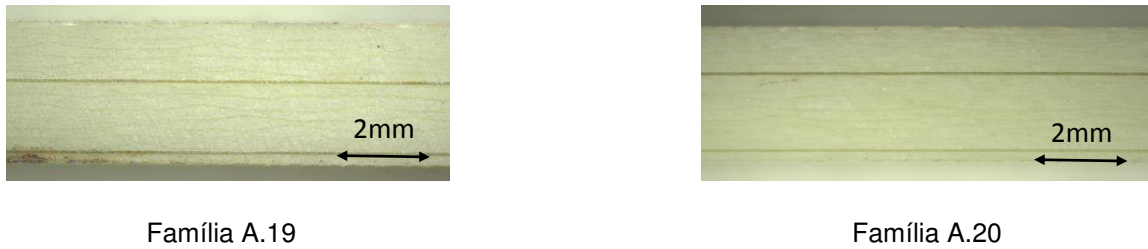


Figura 4.3 Seção transversal das famílias de materiais compósitos obtidos (LAB. UNITAU, 2017).

Após uma análise em mais profundidade da microestrutura dos materiais compósitos via microscopia óptica após o polimento, foi observado regiões escuras (fibra de vidro), regiões claras (resina epóxi) e também a presença de porosidade na matriz em um nível relativamente elevado no compósito, como pode ser observado pelas regiões na cor preta, (algumas indicadas pelas setas), mostrada na Figura 4.4.

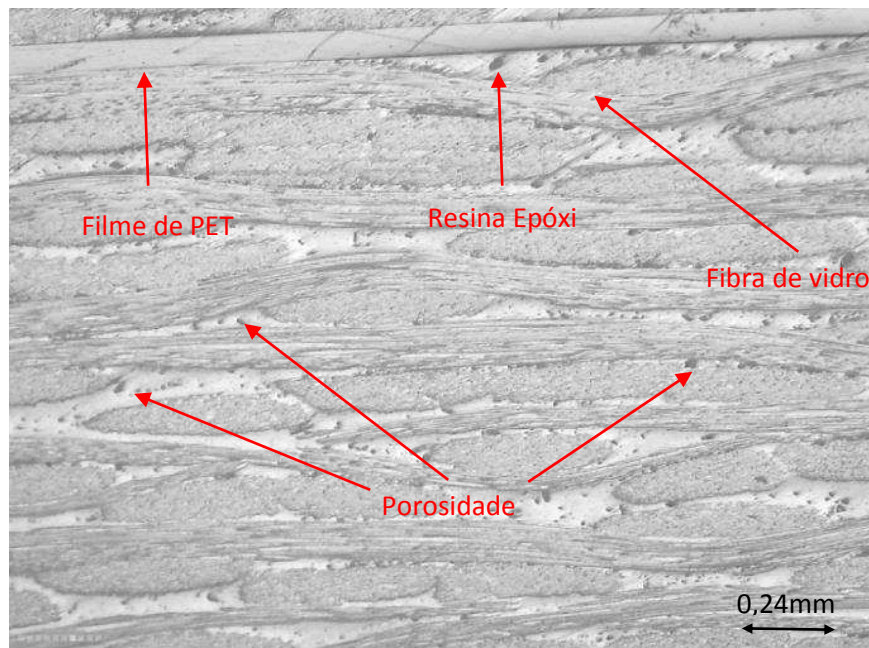


Figura 4.4 Microscopia óptica da seção transversal do compósito obtido, aumento de 50X (família A.4).

Em um material compósito avançado, o qual é processado via saco de vácuo e auto-clave, o nível de porosidade da matriz epóxi é de no máximo 2%, em volume, e a microscopia óptica de um compósito processado nessas condições não apresenta um nível de porosidade como observado na Figura 4.4. A porosidade observada deve-se ao tipo de arquitetura utilizada, envolvendo a intercalação de filmes finos de PET, o qual impede a retirada adequada dos gases voláteis durante o processo de cura/polimerização da matriz termorrígida, e assim os gases presos na matriz geram porosidade.

A presença de porosidade gera concentração de tensões ao redor do poro, levando a formação de trincas e sua conseqüente propagação, o que no final leva a uma redução na vida útil do material compósito. Assim, sugere-se que em trabalhos futuros seja utilizado um filme fino de PET poroso, para que os gases possam evoluir e serem retirados da matriz.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou o aprendizado do processo de fabricação de compósitos estruturais absorvedores de radiação eletromagnética. Partindo de um processo de fabricação usual na indústria para a produção de materiais compósitos avançados, foram utilizadas diversas camadas de tecido pré-impregnado com resina (matriz termorrígida tipo epóxi) e filme fino de PET (poli tereftalato de etileno), com espessura 0,080 mm, totalizando 25 famílias de compósitos.

Além disso, também permitiu um trabalho dentro do Laboratório de Materiais da Universidade de Taubaté para obter dados mais consistentes sobre como os materiais compósitos com camadas de tecido de fibra de vidro/resina epóxi e os filmes de PET reagem aos cortes com uma serra manual (vibração com baixa frequência), e uma máquina de corte com disco diamantado em alta rotação (vibração em alta frequência), para a obtenção dos corpos-de-prova e depois serem analisados via microscopia.

A partir de medições realizadas com um micrometro milesimal, foi observado que os compósitos da família A.1 até família A.20 apresentaram a mesma medida de 3,400mm, e as famílias A, B, C, D e E obtiveram as medidas 3,400mm, 3,480mm, 3,580mm, 3,720mm e 3,800mm, pois foram sucessivamente acrescidas de um filme fino, aumentando aproximadamente de acordo com a espessura do mesmo, isto permitiu concluir que não houve erro na montagem das configurações dos compósitos.

Ao final, foi utilizado um microscópio estereoscópio, e com ele foi feita a macrografia da seção transversal de todos os corpos-de-prova para uma análise da consolidação entre as camadas de fibras de vidro e filmes finos, e foi observado que não se apresentou delaminação entre as mesmas. Posteriormente, em uma análise mais aprofundada, através do uso de um microscópio óptico, foi observado uma porosidade elevada nas amostras, o que poderia acarretar propagação de trincas, redução da resistência e vida útil dos compósitos. Portanto, foi concluído que em trabalhos futuros seja utilizado os filmes finos PET de uma outra forma para que se encontre um compósito com menos porosidades

REFERÊNCIAS

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

ALEKSEIEV, A. V.; et al. INTERNACIONAL COFERENCE ON SPIN-ELECTRONICS AND GYROVECTOR ELECTRODYNAMICS, 10, 2001, Firsanovka. **Stealth Tecnology**. Rússia: Moscou Power Engineering Institute, 2001. 6 p.

ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS – ALMACO. **Retração da Industria Prejudica Setor de Compósitos**. São Paulo, 2015. Disponível em <WWW.almaco.org.br. Acesso em 23 Jun. 2015.

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., GILGINBACH, R.M., Microwave Absorption in a Thin Film, **Applied Physics Letters**. V.82 (9), pp.1353, 2003.

BOSMAN, H., LAU,Y.Y., GILGINBACH, 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.

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 Acesso em 20 Jul 2014.

EMERSON, W. H. Eletromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. v.21 (4), Julho, pp.338-388, 1973.

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** Nº 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.

GONÇALVES, V. F. M.; **Materiais Compósitos Estruturais Atenuadores de Radiação Eletromagnética (8,2-12,4 GHz)**. Mestrado em Engenharia – UNITAU – 2015.

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

ISHII, N., YASAKA, Y., **U.S. Patent** Nº 6823816, 2004.

JANOS, W.A., **US Patent** Nº 5298903, 1994.

JOHNSON, R.N., Radar-Absorbing Material: A Passive Role in an Active Scenario. **The International Countermeasure Handbook**. 11th 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.

KV Microwave Materials. World Wide Web: www.kvmmindia.com Acesso em 20 Jul 2014.

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

KNOTT, E. F.; SHAEFFER, J. F.; TULEY, M. T. **Radar cross section, its prediction, measurement and reduction**. Artech House, Inc., 1895, p. 297.

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.

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.

NOHARA, E. L. **Estudo do Comportamento Eletromagnético de Filmes Finos com Espessuras na Ordem Nanométrica**, Relatório Técnico, Taubaté, SP. 05/02/2012

NOHARA, E. L. **Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos**. Tese (Doutorado em Ciências no Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Campo Montenegro, São José dos Campos, SP – Brasil. 2003.

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, **Bulding 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.

R & F Products, Microwave Absorbers. World Wide Web: 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 Acesso em 20 Jul 2014.

SLEMING, W. J. **An Introduction to Microwave Absorbent Materials**. TechnicasReferencefromPlesseyMaterials, 1998.

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

TUSCH, K. N., **US Patent** N° 5225284, 1993.

ZMUROV, A. V. Redução da Seção Reta Radar de Aeronaves. Fábrica de aeronaves MIG (Mikoyan & Gurevich) Moscou, Rússia. Estágio Técnico de Evandro Luís Nohara, março 2002.