

## **CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE MICRO CILINDROS MACIÇOS DE FIBRA DE CARBONO NA FAIXA DE MICRO- ONDAS**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/INPE/CNPq)

Roberto Camargo Portes (ETEP – Faculdades, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: robertocportes@gmail.com

Sandro Fonseca Quirino (CTE/LAS/INPE, Orientador)  
E-mail: sandro10quirino@gmail.com

Dr. Mauricio Ribeiro Baldan (CTE/LAS/INPE)



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à agência financiadora do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pela assistência financeira prestada ao desenvolvimento deste trabalho, e aos co-autores que colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.



## RESUMO

Materiais atenuadores de radiação eletromagnética (MARE) na faixa de frequência das microondas tem atraído grande atenção nas aplicações militares e civis, devido ao grande aumento de interferência eletromagnética que veem causando sérios problemas como o mau funcionamento de dispositivos eletrônicos e os efeitos prejudiciais que podem ser causados à saúde devido a exposição à radiação eletromagnética. Com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento da tecnologia de MARE no ambiente aeronáutico e aeroespacial, este trabalho tem produzido e caracterizado amostras de compósito polimérico a base de borracha de silicone e filamentos de fibra de carbono trançada. Este estudo analisa a relação entre as variações dos ângulos de orientação das tranças de fibra de carbono na matriz de silicone e a combinação de multicamadas. A caracterização morfológica e estrutural da fibra de carbono foi obtida através das técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difractometria de Raios-X (DR-X) e Espectroscopia RAMAN. A caracterização do potencial de atenuação eletromagnética dos compósitos produzidos, com 1,0 mm de espessura e orientações de 0°, 30°, 60° e 90° no plano X – Y, e uma amostra com a combinação de todas as orientações dispostas em multicamadas e com espessura de 4,0 mm, foram avaliados através do Analisador Vetorial de Redes (VNA) na faixa de frequência referente à Banda-X (8,2 – 12,4 GHz). Neste sentido as amostras produzidas foram minuciosamente estudadas afim de se identificar o seu potencial de atenuação de radiação eletromagnética com relação às variações do ângulo de orientação das fibras no interior da matriz de silicone e à radiação incidente. Os resultados do parâmetro de espalhamento (Parâmetro – S) das amostras apresentaram valores muito significativos para à aplicação como MARE, sendo os valores obtidos similares aos de materiais metálicos com alto índice de reflexão e baixo índice de transmissão, com ( $S_{11} - S_{22}$ ) variando entre 0.93 à 0.99 e ( $S_{21} - S_{12}$ ) entre 0.05 à 0.0 para todas as amostras analisadas nesse trabalho.

Palavras-chave: Banda – X. Compósito polimérico. Fibra de carbono. Interferência Eletromagnética. Materiais atenuadores de radiação eletromagnética. Parâmetro – S.



## ABSTRACT

Radiation absorbent materials (RAM) in the frequency range of microwaves have attracted great attention in military and civil applications due to the great increase of electromagnetic interference that it is causing serious problems like the malfunction of electronic devices and the harmful effects that can be caused by exposure to electromagnetic radiation. With the objective of contributing to the development of the RAM technology in the aeronautical and aerospace environment, this work has produced and characterized polymer composite samples based on silicone rubber and braided filaments of carbon fiber. This study analyzes the relationship between the orientation angles of the carbon fiber braids in the silicone matrix and the combination of multilayers. The morphological and structural characterization of the carbon fibers were obtained through the Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (DR-X) and RAMAN spectroscopy techniques. The characterization of the electromagnetic attenuation potential of the composites produced with a thickness of 1.0 mm and orientations of 0 °, 30 °, 60 ° and 90 ° in the X – Y plane, and one sample with the combination of all orientations in a multilayer arrangement and thickness of 4.0 mm, were analyzed by the Vector Network Analyzer (VNA) in the frequency range of the X – band (8.2 - 12.4 GHz). In this work the samples produced were carefully studied in order to identify their potential of attenuation of the incident electromagnetic radiation with respect to the variations of the orientation angles of the carbon fibers inside the matrix of silicone. The results of the scattering parameter (Parameter – S) of the samples presented very significant values for the application as MARE, and the values obtained were similar to those of metallic materials with high reflection index and low transmission index, with ( $S_{11} - S_{22}$ ) varying between 0.93 and 0.99 and ( $S_{21} - S_{12}$ ) between 0.05 and 0.0 for all samples analyzed in this work.

Key words: Carbon fiber. Electromagnetic Interference. Parameter – S. Polymer composite. Radiation absorbent materials. X – band.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 - Estrutura das fibras de carbono. ....	22
Figura 3.2 - Analisador Vetorial de Redes, inserção mostrando o guia de ondas retangular e o porta amostra com e sem amostras. ....	23
Figura 4.1 - Representação esquemática do compósito polimérico desenvolvido no estudo: I - Amostra com uma camada de FC orientada, II - Amostra com multicamadas de FC orientada. ....	24
Figura 5.1 - Microscopia Eletrônica de Varredura das fibras de carbono. ....	26
Figura 5.2 - Difratoograma de raios – X das fibras de carbono. ....	27
Figura 5.3 - Espectroscopia RAMAN das fibars de carbono. ....	27
Figura 5.4 - Parâmetro – S dos compósitos poliméricos. ....	28
Figura 5.5 - Permissividade elétrica complexa dos compósitos poliméricos. ...	31
Figura 5.6 - Permeabilidade magnética complexa dos compósitos poliméricos.	



## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 5.1 – Sumarização da permissividade e permeabilidade complexas dos DUTs. ....	33



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
MARE	MATERIAIS ATENUADORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA
EMI	<i>ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE</i>
RFI	<i>RADIO FREQUENCY INTERFERENCE</i>
SE	<i>SHIELDING EFFECTIVENESS</i>
HIRF	<i>HIGH-INTENSITY RADIATED FIELDS</i>
ICPS	<i>INHERENTLY CONDUCTIVE POLYMERS</i>
FC	FIBRAS DE CARBONO
VNA	VECTOR NETWORK ANALYZER
NRW	NICOLSON-ROSS-WEIR
RAMAN	ESPECTROSCOPIA RAMAN
MEV	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA
DR-X	DIFRATOMETRIA DE RAIO-X
PAN	POLIACRILONITRILO
DUT	<i>DEVICE UNDER TEST</i>
PARÂMETRO – S	PARÂMETRO DE ESPALHAMENTO
0°	AMOSTRA COM UMA CAMADA E ORIENTADA À ZERO GRAUS
30°	AMOSTRA COM UMA CAMADA E ORIENTADA À TRINTA GRAUS
60°	AMOSTRA COM UMA CAMADA E ORIENTADA À SESSENTA GRAUS
90°	AMOSTRA COM UMA CAMADA E ORIENTADA À NOVENTA GRAUS
MC	AMOSTRA COM MULTICAMADAS
WGP	<i>WIRE-GRID POLARIZERS</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\underline{\varepsilon}'$	PERMISSIVIDADE ELÉTRICA REAL – EFEITO CAPACITIVO
$\underline{\varepsilon}''$	PERMISSIVIDADE ELÉTRICA IMAGINÁRIA – EFEITO DISSIPATIVO
$\underline{\mu}'$	PERMEABILIDADE MAGNÉTICA REAL – EFEITO CAPACITIVO
$\underline{\mu}''$	PERMEABILIDADE MAGNÉTICA IMAGINÁRIA – EFEITO DISSIPATIVO
$\theta$	ÂNGULO THETA





## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 objetivos do trabalho.....	21
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3 Fundamentação teórica .....	21
3.1 Carbono e Fibra de Carbono .....	21
3.2 Caracterização Eletromagnética .....	22
4 Materiais e métodos.....	24
5 análises e resultados .....	25
5.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura .....	25
5.1.2 Difratomia de Raio – X.....	26
5.1.3 Espectroscopia RAMAN.....	27
5.2 Caracterização Eletromagnética.....	27
5.2.1 Parâmetro – S das amostras.....	28
5.2.2 Permissividade elétrica ( $\epsilon'$ e $\epsilon''$ ) e Permeabilidade magnética ( $\mu'$ e $\mu''$ ) complexas .....	30
6 CONCLUSÃO .....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34



## 1 INTRODUÇÃO

Materiais atenuadores de radiação eletromagnética (MARE) e interferência eletromagnética (*Electromagnetic interference – EMI*) / interferência de radiofrequência (*Radio frequency interference – RFI*) adquiriram grande importância desde a sua primeira aplicação. No campo militar, o uso de MARE em aeronaves e submarinos ocorreu na Segunda Guerra Mundial para aplicações furtivas [1–3], e atualmente ainda está sendo usado para camuflagem, blindagem efetiva (*Shielding effectiveness – SE*), câmaras anecóicas [4–6]. Atualmente, a necessidade de EMI SE no ambiente aeronáutico e aeroespacial é hoje, mais do que nunca, um caso de grande importância em aplicações de engenharia. Especialmente devido à gravidade em relação à segurança de sistemas e ao bom funcionamento dos dispositivos eletrônicos. Uma vez que haja avanços na tecnologia de eletrônicos e em soluções de rede sem fio, há um aumento na complexidade e no número de eletrônicos usados em aeronaves comerciais e militares, lançadores, satélites e sistemas espaciais que podem ser sensíveis a ruído e EMI [7,8].

A EMI é uma ameaça muito real à aviação e a outros equipamentos eletrônicos usados para comunicação, navegação de voo, transmissão e recepção de sinais de radar e assim por diante. A EMI pode ser causada por fontes variadas, naturais ou provocadas pelo homem, acidentais ou intencionais (por exemplo, raios, explosões solares, descarga eletrostática, campos irradiados de alta intensidade (*High-intensity radiated fields – HIRF*) de radar e vários tipos de transmissores ou equipamentos de comunicação e outros instrumentos eletrônicos a bordo) [9–11].

Em casos em que componentes eletrônicos podem ser sucumbidos aos efeitos de interferências, soluções em EMI SE são urgentes e contam com procedimentos de planejamento e *design* em eletrônica, no qual são altamente sofisticados. O SE dos materiais determinam a capacidade de atenuação de um meio material para proteger um sistema por meio da redução ou eliminação do processo de transmissão da radiação eletromagnética incidente, através dos mecanismos de reflexão e absorção [12–14]. Em propósitos de aplicação,

materiais metálicos são os materiais mais comuns para EMI SE, principalmente devido ao mecanismo de reflexão proporcionado principalmente pela alta condutividade eletromagnética que permite que o material metálico interaja com a radiação eletromagnética somente em sua superfície, uma vez que se é conhecido que os materiais metálicos provem de uma baixa profundidade de penetração (*Skin depth*), por exemplo, para o cobre à 1,0 GHz, a profundidade de penetração é de 2,09  $\mu\text{m}$ , para o níquel à 1,0 GHz, a profundidade de penetração é de 0,47  $\mu\text{m}$  [15]. No entanto, o uso de materiais metálicos como SE enfrenta algumas desvantagens para aplicação no campo aeronáutico e aeroespacial, principalmente devido ao seu alto custo, peso e refletância.

Na linha de materiais compósitos, este trabalho investiga o potencial do uso de compósitos poliméricos ou, mais especificamente, de polímeros inerentemente condutores (*inherently conductive polymers – ICPs*) [16,17] como protetor de EMI no ambiente aeronáutico e aeroespacial. A combinação de materiais condutores com materiais dielétricos permite o benefício das vantagens de ambas as características das fibras de carbono (FC) e da borracha de silicone. A principal vantagem do uso de ICP é a possibilidade de obter condutividade, mas na fração de peso e custo dos metais, e ainda sendo mais ecologicamente correto. Outra vantagem são as boas características que as borrachas de silicone podem fornecer em diferentes áreas e requisitos de aplicação. Como resistência ao calor, retardamento de chamas, estabilidade química, boa resistência às intempéries, versatilidade mecânica [18]. E quando preenchido com FC, possui boas propriedades elétricas, mecânicas e térmicas. A capacidade de induzir dipolos elétricos, enquanto dissipando uma mínima energia na forma de calor também é possível [19].

Para o ambiente aeronáutico e aeroespacial, a contribuição para o desenvolvimento da tecnologia MARE e a proteção contra EMI na faixa de frequência da banda – X (8,2 - 12,4 GHz) é o objetivo principal deste trabalho que descreve o processo de produção, caracterização e possível aplicação em EMI SE.

## **2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

De forma geral, este projeto tem seu foco no desenvolvimento de materiais atenuadores de radiação eletromagnética para serem utilizados em ambiente aeronáutico e aeroespacial.

Especificamente, será estudada a relação entre as variações dos ângulos de orientação das tranças de fibra de carbono na matriz de silicone e a combinação de multicamadas.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar morfológica e estruturalmente as fibras de carbono, através das técnicas de Difração de Raio-X (DRX), espectroscopia RAMAN, Microscopia Eletrônica de Varredura com Emissão de Campo (MEV).
- Produzir amostras de compósito polimérico a base de fibras de carbono trançadas e com diferentes variações de orientação angular e combinação de multicamadas em matriz dielétrica de silicone.
- Caracterizar a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética das amostras do compósito polimérico analisando a influência das variações de angulação e combinação de multicamadas das amostras, com o padrão de comportamento eletromagnético em função da frequência. O potencial da aplicabilidade destes compósitos como blindagem eletromagnética no setor aeroespacial também será estudado.

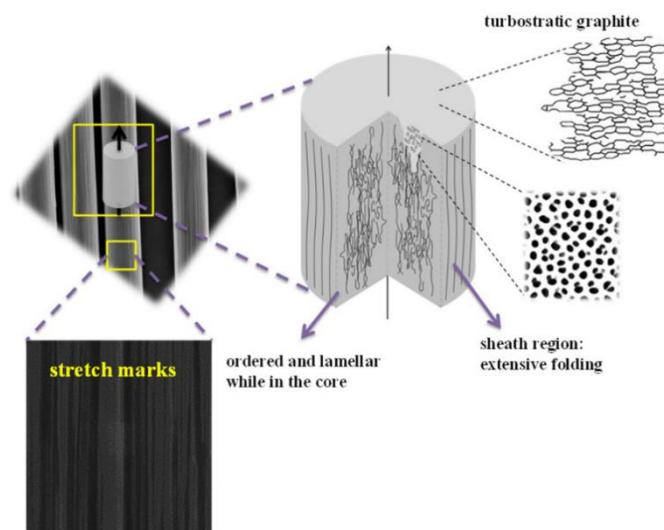
## **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **3.1 Carbono e Fibra de Carbono**

Carbono é um dos elementos mais comuns do universo e um dos mais úteis conhecido pelo homem, é criado facilmente nas estrelas, pode ser encontrado em abundância em cometas e na atmosfera dos planetas do sistema solar. O sexto elemento na tabela periódica, possui quatro elétrons em sua camada de valência com configuração de  $1s^2 2s^2 2p^2$ . Um elemento muito versátil, cada átomo de carbono pode fazer ligação com até outros quatro átomos e até mesmo se conectar a outros átomos de diferentes elementos criando

complicadas configurações de cadeias ou anéis compostos e possibilitando então criar diferentes formas com diferentes propriedades. Tal característica é conhecida como alotropia, capacidade de um elemento existir em dois ou mais arranjos tridimensionais, as formas alotrópicas mais conhecidas do carbono são o carbono amorfo, grafite e diamante, com uma outra forma conhecida recentemente como o buckminsterfullerene C<sub>60</sub> (fulerenos) [20]. O carbono é o elemento básico da FC, que podem ser preparadas a partir de materiais precursores poliméricos, tais como poliacrilonitrilo (PAN), celulose, piche e policloreto de vinilo. Possui propriedades bem características como um bom condutor elétrico, ótima resistência mecânica e térmica. Essencialmente, as FC são fibras (filamentos, reboques, fios, mechas) que consistem em pelo menos 92,0 % (fração de massa) de carbono [21]. Como segue na Figura 3.1 abaixo [22].

Figura 3.1 - Estrutura das fibras de carbono.



Fonte: Andressa R. Pereira et al. (2017).

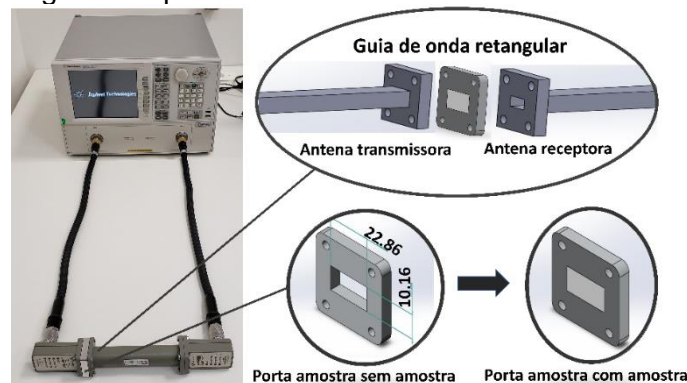
### 3.2 Caracterização Eletromagnética

A caracterização eletromagnética foi realizada usando o Analisador de Rede Vetorial (*Vector Network Analyzer – VNA*) modelo N5232A, com o pacote de *software* da *Agilent*. O VNA permite medir através de métodos numéricos os comportamentos relacionados às propriedades elétricas e magnéticas ( $\epsilon_r$  ;  $\mu_r$ ) do dispositivo em teste (*Device under test – DUT*). O VNA emite um pulso eletromagnético ( $V^+$ ) na faixa de 8,2 GHz a 12,4 GHz, onde através de um guia

de onda esse pulso atinge o DUT e então através de seus detectores de diodo (receptores) captam o sinal que volta ( $V^-$ ) e realizam as medidas de magnitude e fase do sinal, informando quais são os parâmetros de espalhamento (Parâmetro – S ( $S_{11}$ ;  $S_{21}$ ;  $S_{22}$ ;  $S_{12}$ )) da análise de acordo com a relação  $Parâmetro\ S = \frac{V^+}{V^-}$ , possibilitando assim a leitura da reflexão e transmissão do sinal emitido [23]. O coeficiente de reflexão  $R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2$  representa a porção da radiação eletromagnética que foi refletida pela primeira fronteira do meio material. O coeficiente de transmissão  $T = |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2$  representa a porção da radiação que sofreu o fenômeno de transmissão. E o coeficiente de absorção  $A = 1 - (T + R)$  representa a porção da radiação que foi absorvida pelo meio material [24].

O comportamento da permissividade elétrica complexa ( $\epsilon'$  – efeito capacitivo,  $\epsilon''$  – efeito dissipativo) e a permeabilidade magnética complexa ( $\mu'$  – efeito capacitivo,  $\mu''$  – efeito dissipativo) do material é estimado através do método Nicolson Ross Weir (NRW) também conhecido como Método de Transmissão e Reflexão, em materiais homogêneo e isotrópico [25,26]. Este método consiste em calcular a permissividade elétrica complexa e a permeabilidade magnética complexa através do parâmetro – S medido em um guia de onda retangular. Primeiramente calcula-se o coeficiente de reflexão e transmissão a partir do parâmetro – S, e em seguida obtêm-se a permissividade e permeabilidade por meio da aplicação dos métodos numéricos de NRW.

Figura 3.2 - Analisador Vetorial de Redes, inserção mostrando o guia de ondas retangular e o porta amostra com e sem amostras.

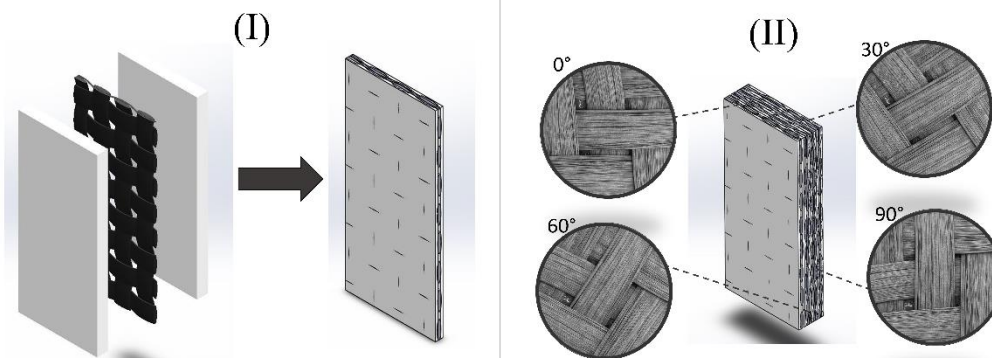


Fonte: O autor.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram-se utilizados dois materiais vistos como essenciais para a produção de um MARE. A FC trançada, utilizada como reforço estrutural e como um material condutor, e a borracha de silicone branca utilizada como matriz dielétrica. No total cinco amostras de compósitos poliméricos foram produzidas em disposição de multicamadas e seguindo as medidas de 22,86 mm de comprimento por 10,16 mm de largura. Como exemplificado na Figura 4.1 – I, quatro das cinco amostras nomeadas respectivamente como (0°, 30°, 60° e 90°) contêm apenas uma camada de FC e uma variação quanto à orientação dos ângulos de cada camada de 0°, 30°, 60° e 90°, respectivamente para cada amostra, e espessura total de 1,5 mm. E como mostrado na Figura 4.1 – II, uma amostra nomeada como (MC) contendo todas as quatro variações de camadas de FC orientada e combinadas na disposição de multicamadas, com espessura total de 4,5 mm.

Figura 4.1 - Representação esquemática do compósito polimérico desenvolvido no estudo: I - Amostra com uma camada de FC orientada, II - Amostra com multicamadas de FC orientada.



Fonte: O autor.

A caracterização morfológica e estrutural dos materiais utilizados neste trabalho é dada respectivamente pelo: MEV utilizando um microscópio de emissão de campo de ultra-alta resolução TESCAN Mira 3 equipado com um sistema de detecção in-less e operado a uma voltagem de aceleração de 1 kV; DRX, realizados pelo PANalytical X – pert Pro, utilizando raios – X de  $\text{CuK}\alpha$ , aceleração de tensão e corrente de 30 – 50 kV e 15mA, respectivamente, os dados de difração foram coletados com varredura de passos de  $0,02^\circ 2\theta$  e um



tempo de 1 s para cada passo; Raman adquirida usando o Horiba Scientific LabRAM HR Evolution usando a linha verde de um laser de argônio  $\lambda = 514,5$  nm. As amostras foram colocadas em um substrato de vidro, a intensidade do laser foi de 10 mW na amostra e nenhum filtro foi usado. Varreduras ampliadas de 3000 a 500  $\text{cm}^{-1}$  foram realizadas com tempos de exposição de 30 s.

## 5 ANÁLISES E RESULTADOS

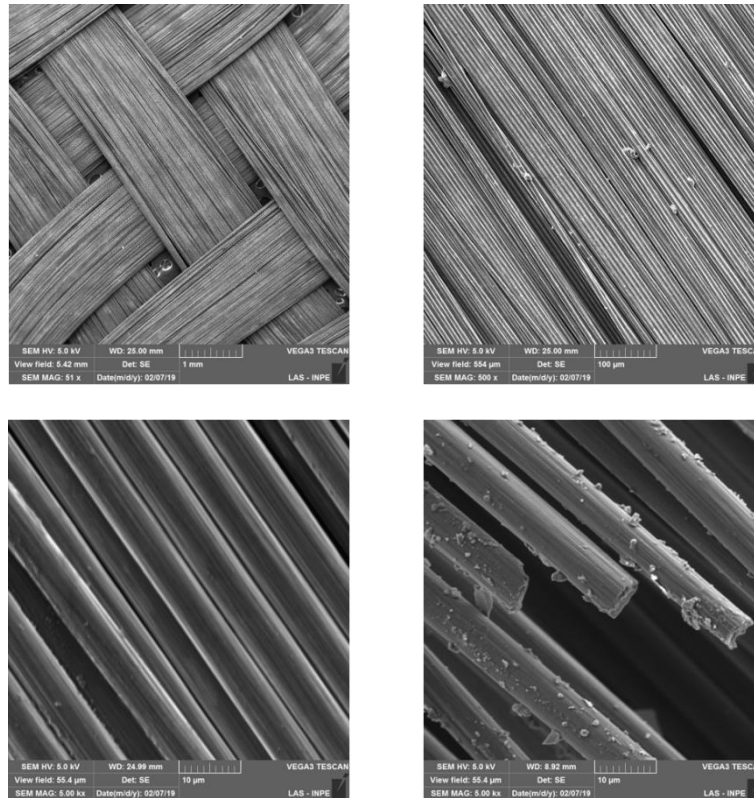
No primeiro tópico deste capítulo é apresentado os resultados referentes as caracterizações morfológica e estrutural realizadas na FC. O segundo tópico é referente a caracterização eletromagnética feita através do VNA, na faixa de frequência da Banda – X (8,2 a 12,4 GHz).

### 5.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

A FC apresentada é do tipo tecido bidirecional ( $0^\circ/90^\circ$ ) com tramas do tipo *Twill* 2x2, com uma pluralidade de filamentos contínuos de carbono não-torcidos com cerca de 5 – 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro. As tramas dos filamentos de carbono são cruzadas por cima e por baixo com uma alternância de dois passos entre si, formando uma malha com cavidades de aproximadamente 0,5 mm de comprimento. De acordo com os estudos de Balian R. et al, a interação de ondas eletromagnéticas com condutores é particularmente dependente das características estruturais e morfológicas do material condutor [27,28]. Tendo em consideração a organização morfológica da FC, estes entrelaçamentos de fios fornecidos a partir de uma tecnologia têxtil podem ter um comportamento particular com as ondas eletromagnéticas. Considerando que, no que diz respeito ao conceito de polarizadores lineares para luzes ópticas, é bem conhecido que é possível controlar a transmissão das ondas eletromagnéticas com uma polarização específica, enquanto que bloqueando ondas eletromagnéticas de outras polarizações [29–31]. Os polarizadores também podem ser aplicados a outros tipos de ondas eletromagnéticas, como as ondas de rádio, microondas, e raios – X [32–34]. Para a aplicação com microondas, a técnica de polarização da divisão de feixe [35], especialmente os polarizadores de grade de arame (*Wire-grid polarizers – WGP*), pode ter uma boa relevância com o material de estudo deste trabalho. Uma vez que o WGP é um conjunto

de fios metálicos em paralelos "material condutor" colocado em um plano que pode refletir a polarização não transmitida [36]. A Figura 5.1 apresenta as imagens de MEV da FC trançada evidenciando a orientação das tranças de carbono, o conjunto de filamentos, diâmetro, superfície lisa e a forma sólida.

Figura 5.1 - Microscopia Eletrônica de Varredura das fibras de carbono.

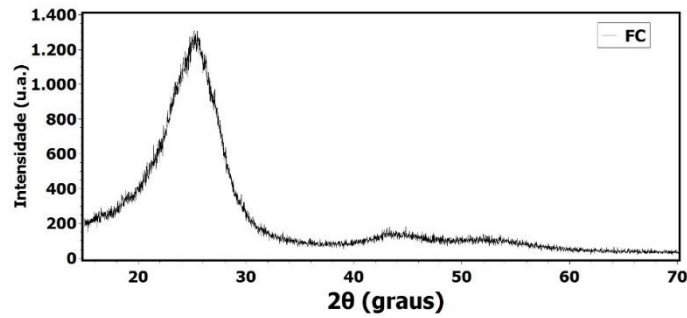


Fonte: O autor.

### 5.1.2 Difractometria de Raio – X

Os padrões de DRX Figura 5.2 são característicos de materiais carbonosos. A estrutura atômica refratou os feixes de raios – X no ângulo específico relacionado aos espaçamentos Inter atômicos da FC, com o pico 002 no ângulo  $2\theta$  de  $25,30^\circ$  e intensidade de 1,279 a.u. [37–39]. O pico obtido é o pico mais relevante da estrutura cristalina do carbono, sem a presença de outras características de picos de impurezas.

Figura 5.2 - Difratoograma de raios – X das fibras de carbono.

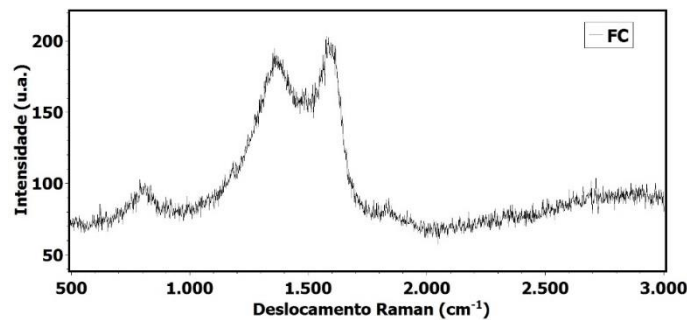


Fonte: O autor.

### 5.1.3 Espectroscopia RAMAN

A fim de confirmar a estrutura cristalina da FC, a espectroscopia Raman, como mostrada na Figura 5.3, exibe a região dos principais picos característicos de materiais carbonosos, os chamados picos D e G, com as bandas a  $1365\text{ cm}^{-1}$  e  $1585\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente. Os espectros observados estão de acordo com os esperados para a estrutura cristalina da grafite, onde o pico D representa as desordens ou defeitos na estrutura de carbono e o pico G representando a estrutura da grafite [39–41].

Figura 5.3 - Espectroscopia RAMAN das fibras de carbono.



Fonte: O autor.

## 5.2 Caracterização Eletromagnética

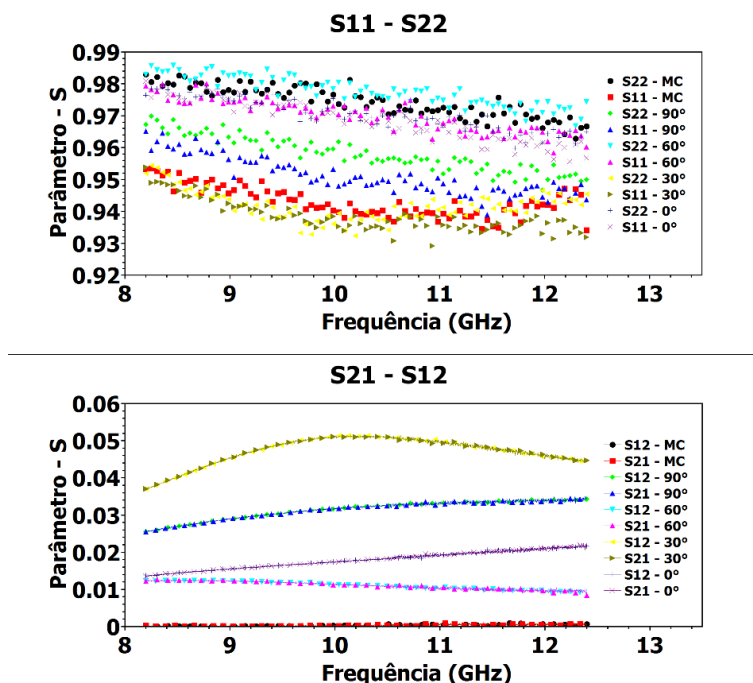
As amostras de compósitos poliméricos foram eletromagneticamente caracterizadas pelo processamento do parâmetro – S através do VNA, e com os resultados obtidos a partir do processo de reflexão ( $S_{11} - S_{22}$ ) e transmissão ( $S_{21} - S_{12}$ ), a permissividade elétrica complexa ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) e a permeabilidade

magnética complexa ( $\mu'$  e  $\mu''$ ) foram calculadas através do método de NRW [25,26] usando o algoritmo numérico disponível pelo *Agilent software package*.

### 5.2.1 Parâmetro – S das amostras

A Figura 5.4 apresenta os parâmetros – S medidos a partir das amostras produzidas para este trabalho. Os resultados apresentam que todas as amostras são homogêneas e isotrópicas, permitindo uma boa reprodutibilidade e confiança das medidas realizadas, uma vez que ambos os sinais de  $S_{11} - S_{22}$  e ambos os sinais de  $S_{21} - S_{12}$  são praticamente iguais. Os gráficos mostram que independentemente da variação dos ângulos de orientação das FC os valores de  $S_{11} - S_{22}$  referente ao efeito de reflexão das amostras, permaneceram bem altos e próximos e com uma pequena diferença de  $\sim 0,04$  entre os extremos das medidas. E os valores de  $S_{21} - S_{12}$  referentes ao efeito de transmissão, muito baixos e com uma pequena diferença de  $\sim 0,05$ , sendo que a amostra de MC não apresentou nenhuma parcela de transmissão ao longo da faixa de frequência, com seu valor próximo de 0,0.

Figura 5.4 - Parâmetro – S dos compósitos poliméricos.



Fonte: O autor.

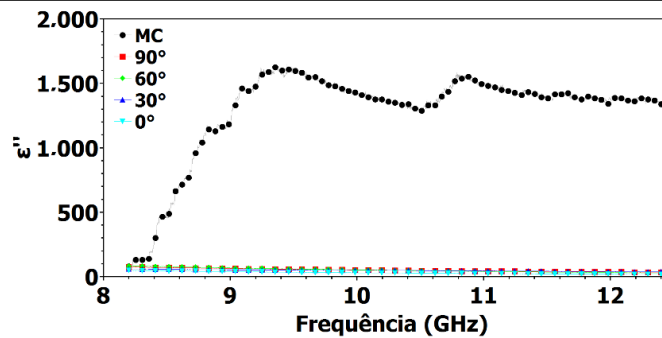
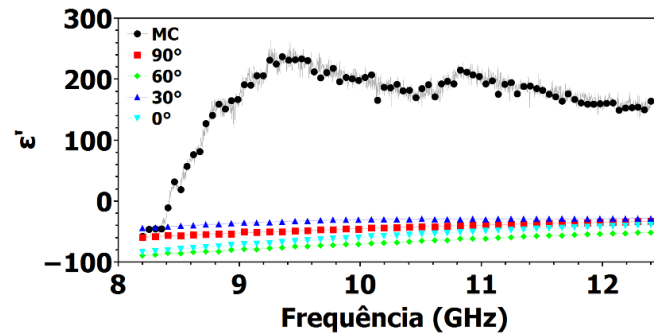
Esta semelhança nos resultados de Parâmetro – S, é referenciada às tranças de FC que interagem com a onda eletromagnética de um modo onde os filamentos de FC alinhados paralelamente à onda eletromagnética, tem uma via média maior para induzir o movimento de elétrons ao longo do comprimento dos filamentos de FC, refletindo então a onda eletromagnética incidente [42]. Hong Gun Kim et al discutem em seu trabalho a relação entre o ângulo de orientação e o número de camadas de plásticos reforçados com fibra de carbono, pela interação com a radiação eletromagnética. E confirma que, à medida em que se orienta as fibras de carbono em paralelo com a onda eletromagnética e aumenta a quantidade de material em uma disposição de multicamadas, a interação com a onda eletromagnética também aumenta. Tal comportamento condiz com o conceito de WGP, tal como presumido na seção 5.1.1, onde analiticamente a componente do campo eletromagnético paralelo aos filamentos se comportam como um material refletivo, devido ao longo caminho de condução que pode vir a induzir um maior número de elétrons ao longo do comprimento dos filamentos de FC. E a componente do campo eletromagnético perpendicular aos filamentos se comportam como um material transmissivo, uma vez que a onda eletromagnética não é capaz de induzir muitos elétrons através da largura de cada filamento [42]. O trabalho de Hong Gun Kim et al analisa a distribuição dos filamentos orientados a um campo incidente. Contudo, neste trabalho nós desenvolvemos diferentes amostras com fibra de carbono trançada e com variações de angulação e combinação de multicamadas, para que essa combinação permita a atenuação até mesmo de campos elétricos com polarização oblíqua, diferente da analisada no trabalho de Hong Gun Kim et al.

Para propósitos práticos de EMI, a transmissão da radiação eletromagnética pelo meio material não é interessante em aplicações. Pensando desta maneira, o entrelaçamento dos fios de FC é para impedir que a radiação eletromagnética seja transmitida pelo meio material, não importando a direção de incidência. E como evidenciado pelos resultados na Figura 5.4, para todas as amostras com uma variação nos ângulos de orientação, os valores dos Parâmetros – S obtidos são semelhantes entre si.

### 5.2.2 Permissividade elétrica ( $\epsilon'$ e $\epsilon''$ ) e Permeabilidade magnética ( $\mu'$ e $\mu''$ ) complexas

Na Figura 5.5 são apresentados os resultados da permissividade elétrica complexa ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) das amostras ao longo da faixa de frequência da banda – X. Os valores negativos observados na permissividade real ( $\epsilon'$  – efeito capacitivo) das amostras são atribuídos à via de condução longa e contínua que a FC fornece ao longo de seus filamentos contínuos de carbono [43]. Esta continuidade de FC no interior da matriz de silicone favorece ao fenômeno de percolação quando o meio material é submetido a um campo eletromagnético [43]. Tal fenômeno causa o efeito de indução que polariza os elétrons na interface do meio material, e quando a polarização elétrica é alta o suficiente, a permissividade efetiva torna-se negativa [44]. Além disso, os filamentos de fibras de carbono na matriz de silicone podem estar gerando altos níveis de capacitância devido ao entrelaçamento dos fios que formam um arranjo retangular (placas paralelas). P. S. Sreekala et al também afirma que, para materiais com permissividade negativa, as aplicações com absorção e atenuação de microondas se tornam bastante úteis. A parte imaginária da permissividade ( $\epsilon''$  – efeito dissipativo) que é originada do processo de condução e polarização. Apresenta um alto índice em seus valores de  $\sim 80,0$  para as amostras à 8,2 GHz, e um índice massivo nos valores da amostra MC em 12,4 GHz de  $\sim 1338,62$ . Tais resultados estão relacionados à perda dielétrica, quanto maior os valores de  $\epsilon''$ , maior a capacidade de dissipação da energia [45]. Os valores observados podem determinar a capacidade do material de transformar a energia que foi absorvida em aquecimento de Joule [46] pelo efeito de colisões. No caso da FC, suas propriedades físicas, como caracterizado na seção 5.1.2, 5.1.3, apresentam-se boas em termos de transformar a energia em calor, devido à sua estrutura cristalina que fornece uma característica condutora devido ao seu elevado número de elétrons livres, e a sua estrutura amorfa com um grau de desordem ou defeitos na estrutura de carbono. Essa combinação de características é a que gera um alto índice de colisões e, conseqüentemente, um alto índice em sua permissividade imaginária [43,44].

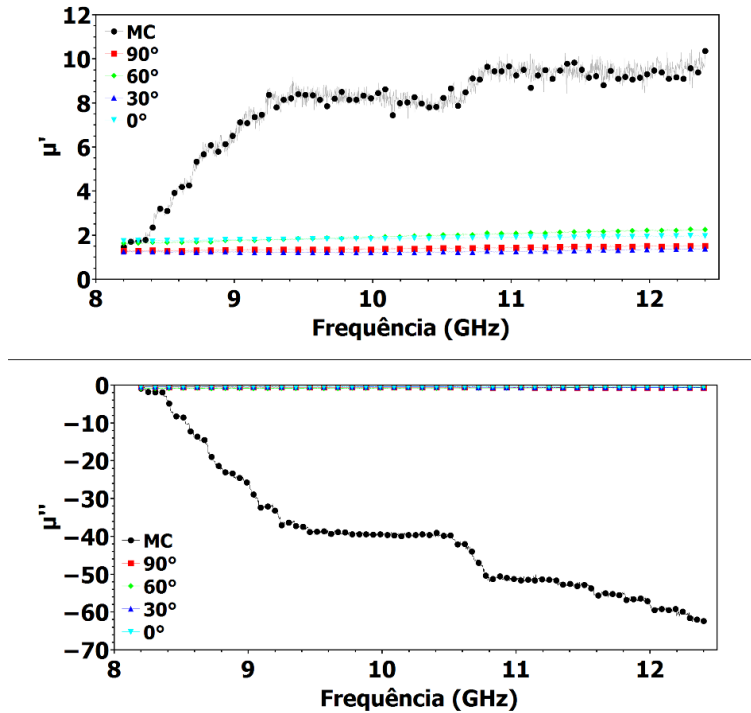
Figura 5.5 - Permissividade elétrica complexa dos compósitos poliméricos.



Fonte: O autor.

Na Figura 5.6 são apresentados os resultados da permeabilidade magnética complexa ( $\mu'$ ;  $\mu''$ ) das amostras ao longo da faixa de frequência da banda – X. Para as amostras com camada única, a permeabilidade magnética permaneceu próxima à unidade do vácuo, conforme esperado para materiais não magnéticos, com  $\mu'$  próximo de 1,0 e  $\mu''$  próximo de 0,0. Embora, para a amostra MC, foi identificado um alto índice nos valores de permeabilidade magnética, com  $\mu' = 10,3$  e  $\mu'' = -62,3$  à 12,4 GHz. Tal aumento na propriedade magnética pode estar associado ao fenômeno de indução de campo magnético devido ao campo elétrico aplicado sobre a amostra. Inicialmente, como a FC possui propriedade elétrica, a interação com a onda eletromagnética incidente ocorre apenas pelo campo elétrico. Porém, como explicado anteriormente, como a FC fornece um bom caminho para a energia eletromagnética ser conduzida, conseqüentemente ela pode gerar uma indução de campo magnético devido à longa percolação elétrica [47].

Figura 5.6 - Permeabilidade magnética complexa dos compósitos poliméricos.



Fonte: O autor.

As características de permissividade elétrica e permeabilidade magnética estão diretamente relacionados à capacidade dos materiais em absorver ou refletir as microondas. No qual, podem explicar os fenômenos de perda dielétrica e perda magnética dos materiais [48]. Como os compósitos poliméricos produzidos são baseados em FC, a principal contribuição que estes materiais podem fornecer para a perda por absorção é a perda dielétrica e não à perda magnética, devido aos baixos valores de permeabilidade magnética  $\mu'$  e  $\mu''$ , ver Tabela 5.1. Entretanto, como a amostra de MC apresentou altos índices de  $\mu'$  e  $\mu''$ , a contribuição pela perda magnética também pode ser determinante para o mecanismo de absorção. Xuehua Gao et al descreveram em seu trabalho que os três principais fatores de perda magnética são os fenômenos de: ressonância natural, ressonância da parede do domínio e a perda da corrente parasita [49]. Em que, para os sistemas analisados neste trabalho, os fatores de ressonância natural e ressonância da parede do domínio podem ser descartados. Visto que os resultados medidos para as amostras de camada única não exibiram o comportamento da ressonância natural, e que a FC não possui características de material magnético. Sobrando então o último possível



comportamento de perda magnética, que é a análise da perda da corrente parasita.

Tabela 5.1 – Sumarização da permissividade e permeabilidade complexas dos DUTs.

Silicone (wt.%)	Fibra de carbono (wt.%)	$\theta^\circ$	Permissividade				Permeabilidade			
			Parte real ( $\epsilon'$ )		Parte imaginária ( $\epsilon''$ )		Parte real ( $\mu'$ )		Parte imaginária ( $\mu''$ )	
			8.2 GHz	12.4 GHz	8.2 GHz	12.4 GHz	8.2 GHz	12.4 GHz	8.2 GHz	12.4 GHz
100.0	0.00	---	3.520	3.406	0.058	0.076	1.046	1.078	0.001	0.002
82.0	18.0	0°	-83.904	-39.214	47.266	16.994	1.739	1.968	-0.439	-0.366
82.0	18.0	30°	-44.171	-28.225	59.772	36.145	1.244	1.378	-0.373	-0.683
82.0	18.0	60°	-89.143	-51.851	83.375	27.316	1.628	2.248	-0.850	-0.648
82.0	18.0	90°	-59.329	-33.038	74.407	34.207	1.298	1.512	-0.533	-0.696
80.0	20.0	ML	-57.434	164.000	79.291	1338.624	1.467	10.369	-0.847	-62.343

Fonte: Produção do autor.

## 6 CONCLUSÃO

Os compósitos poliméricos à base de borracha de silicone e FC apresentaram um desempenho impressionante na análise das propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética complexas na faixa de frequência da banda – X (8,2 a 12,4 GHz).

A FC trançada funcionou muito bem ao apresentar valores consistentes de parâmetros – S independentemente dos ângulos de orientação das camadas de FC no interior da matriz de silicone. O entrelaçamento dos fios de FC proporcionou interação com o campo eletromagnético nas direções horizontal e perpendicular, em que não importando a disposição de orientação das amostras em relação ao campo eletromagnético incidente, a resposta foi efetiva. E sendo ainda mais efetiva quando combinando com disposição de multicamadas com variações de angulação.

Além disso, a matriz dielétrica (borracha de silicone) pode oferecer boas propriedades referentes à resistência ao calor, retardamento de chamas, estabilidade química, boa resistência às intempéries, versatilidade mecânica, e quando preenchida com materiais condutivos a capacidade de induzir dipolos elétricos e dissipar mínima energia na forma de calor.

Os resultados demonstraram propriedades bem promissoras quanto à aplicação destes compósitos poliméricos como MARE e EMI SE em ambiente aeronáutico e aeroespacial, e com possibilidade de aplicação em outras áreas que podem ser sujeitas aos efeitos de EMI.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gaylor K. RADAR ABSORBING MATERIALS - MECHANISMS AND MATERIALS. Mater. Res. Laborstory. 1989;
- [2] Junqueira C, Perotoni M, Lima DR. Microwave absorber materials characterization: Bulk absorbing and electrical/magnetic parameters. 2014 Int. Telecommun. Symp. ITS 2014 - Proc. 2014;7–11.
- [3] Lederer PG. AN INTRODUCTION TO RADAR ABSORBENT MATERIALS (RAM). R. SIGNALS ANID RADARESTABLISHMENT. 1986;
- [4] Micheli D, Pastore R, Gradoni G, et al. Reduction of satellite electromagnetic scattering by carbon nanostructured multilayers. Acta Astronaut. [Internet]. 2013;88:61–73. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.03.003>.
- [5] Liu L, Kong LB, Yin WY, et al. Characterization of single- and multiwalled carbon nanotube composites for electromagnetic shielding and tunable applications. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2011;53:943–949.
- [6] Silva MWB, Kretly LC. A new concept of RAM-Radiation Absorbent Material: Applying corrugated surfaces to improve reflectivity. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. Proc. 2011;556–560.
- [7] Vinto N, Tropea M, Fazio P, et al. A survey on electromagnetic interferences on aircraft avionics systems and a GSM on board system overview. Sensors, Command. Control. Commun. Intell. Technol. Homel.

- Secur. Homel. Def. XIII. 2014;9074:90740H.
- [8] Ely JJ. Electromagnetic Interference to Flight Navigation and Wireless. 2007;1–28.
- [9] Sharma M. DESIGN OF EMI / EMC COMPATIBLE AVIONICS AND. 2018;
- [10] Zhang B, Soltani SA, Le LN, et al. Fabrication and assessment of a thin flexible surface coating made of pristine graphene for lightning strike protection. Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol. 2017;216:31–40.
- [11] Gutiérrez GG, Alvarez J, Pascual-Gil E, et al. HIRF virtual testing on the C-295 aircraft: On the application of a pass/fail criterion and the FSV method. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2014;56:854–863.
- [12] Liu X, Yin X, Kong L, et al. Fabrication and electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanotube reinforced carbon fiber/pyrolytic carbon composites. Carbon N. Y. [Internet]. 2014;68:501–510. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2013.11.027>.
- [13] Kim HG, Shin HJ, Kim G-C, et al. Electromagnetic interference shielding characteristics for orientation angle and number of plies of carbon fiber reinforced plastic. Carbon Lett. 2014;15:268–276.
- [14] Yang S, Lozano K, Lomeli A, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites. Compos. Part A Appl.

- Sci. Manuf. 2005;36:691–697.
- [15] Jones R, Lomeli A, Yang S, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2004;36:691–697.
- [16] Baker CO, Huang X, Nelson W, et al. Polyaniline nanofibers: broadening applications for conducting polymers. *Chem. Soc. Rev.* [Internet]. 2017;46:1510–1525. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28098293>.
- [17] Arjmand M, Chizari K, Krause B, et al. Effect of synthesis catalyst on structure of nitrogen-doped carbon nanotubes and electrical conductivity and electromagnetic interference shielding of their polymeric nanocomposites. *Carbon N. Y.* 2016;98:358–372.
- [18] ShinEtsu. Characteristic properties of Silicone Rubber Compounds Meeting the increasingly diverse and sophisticated needs of industry with the unique properties of silicone rubbers. 2013;
- [19] Ning MQ, Lu MM, Li JB, et al. Two-dimensional nanosheets of MoS<sub>2</sub>: a promising material with high dielectric properties and microwave absorption performance. *Nanoscale.* 2015;7:15734–15740.
- [20] Materials S. Properties and Characteristics of Graphite for Industrial Application. *Ind. Prod. intro.* 2015;13.1-13.2.
- [21] Morgan P. CARBON. 2005.

- [22] Pereira AR, De Souza JCP, Gonçalves AD, et al. Bioelectrooxidation of ethanol using NAD-dependent alcohol dehydrogenase on oxidized flexible carbon fiber arrays. *J. Braz. Chem. Soc.* 2017;28:1698–1707.
- [23] Karimi P, Ostoja-Starzewski M, Jasiuk I. Experimental and computational study of shielding effectiveness of polycarbonate carbon nanocomposites. *J. Appl. Phys.* 2016;120.
- [24] Bhaskara Rao B V., Chengappa M, Kale SN. Lightweight, flexible and thin Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-loaded, functionalized multi walled carbon nanotube buckypapers for enhanced X-band electromagnetic interference shielding. *Mater. Res. Express.* 2017;4.
- [25] Nicolson AM, Ross GF. Measurement of the Intrinsic Properties Of Materials by Time-Domain Techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1970;19:377–382.
- [26] Weir WB. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability. *Proc. IEEE.* 1974;62:33–36.
- [27] Balian R, Duplantier B. Electromagnetic waves near perfect conductors. I. Multiple scattering expansions. Distribution of modes. *Ann. Phys. (N. Y.)*. 1977;104:300–335.
- [28] Balian R, Duplantier B. Electromagnetic waves near perfect conductors. II. Casimir effect. *Ann. Phys. (N. Y.)*. 1978;112:165–208.
- [29] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to

- applications. *Adv. Opt. Photonics*. 2009;1:1.
- [30] Mulder CL, Reuswig PD, Beyler AP, et al. Dye alignment in luminescent solar concentrators: II Horizontal alignment for energy harvesting in linear polarizers. *Opt. Express*. 2010;18:A91.
- [31] Jagt H, Dirix Y, Hikmet R, et al. Linear polarizers based on oriented polymer blends. *Adv. Mater.* 1998;10:934–938.
- [32] Wang Y, Kempa K, Kimball B, et al. Receiving and transmitting light-like radio waves: Antenna effect in arrays of aligned carbon nanotubes. *Appl. Phys. Lett.* 2004;85:2607–2609.
- [33] Pan S, Zhang Y. Tunable and wideband microwave photonic phase shifter based on a single-sideband polarization modulator and a polarizer. *Opt. Lett.* [Internet]. 2012;37:4483. Available from: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ol-37-21-4483>.
- [34] Hart M, Rodrigues ARD. Tuneable polarizers for X-rays and neutrons. *Philos. Mag. B* [Internet]. 1979;40:149–157. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13642817908246366>.
- [35] Zhao J, Chen Y, Feng Y. Polarization beam splitting through an anisotropic metamaterial slab realized by a layered metal-dielectric structure. *Appl. Phys. Lett.* [Internet]. 2008;92:071114. Available from: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2884322>.
- [36] Bird GR, Parrish M. The Wire Grid as a Near-Infrared Polarizer. *J. Opt.*

Soc. Am. [Internet]. 1960;50:886. Available from:

<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josa-50-9-886>.

- [37] Galiguzov A, Malakho A, Kulakov V, et al. The Influence of Carbon Fiber Heat Treatment Temperature on Carbon-Carbon Brakes Characteristics. *Carbon Lett.* 2013;14:22–26.
- [38] Dhakate SR, Chaudhary A, Gupta A, et al. Excellent mechanical properties of carbon fiber semi-aligned electrospun carbon nanofiber hybrid polymer composites. *RSC Adv.* 2016;6:36715–36722.
- [39] Zhu J, Park SW, Joh H-I, et al. Preparation and characterization of isotropic pitch-based carbon fiber. *Carbon Lett.* 2013;14:94–98.
- [40] Borisov AM, Makunin A V., Mashkova ES, et al. Ion-beam modification of carbon textile Busofit T-040. *J. Phys. Conf. Ser.* 2018;1121.
- [41] Fei J, Luo W, Huang JF, et al. Effect of hydrothermal modified carbon fiber through Diels-Alder reaction and its reinforced phenolic composites. *RSC Adv.* 2015;5:64450–64455.
- [42] Ahn SW, Lee KD, Kim JS, et al. Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography. *Nanotechnology.* 2005;16:1874–1877.
- [43] Zhu J, Wei S, Ryu J, et al. Strain-Sensing Elastomer / Carbon Nanofiber “Metacomposites .” 2011;13215–13222.
- [44] Sreekala PS, Honey J, Aanandan CK. Development and characterization

- of camphor sulphonic acid doped polyaniline film with broadband negative dielectric constant for microwave applications. *Mater. Res. Express* [Internet]. 2018;5:56302. Available from: <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/aabe0f>.
- [45] Cheng C, Fan R, Fan G, et al. Tunable negative permittivity and magnetic performance of yttrium iron garnet/polypyrrole metacomposites at the RF frequency. *J. Mater. Chem. C* [Internet]. 2019;7:3160–3167. Available from: <http://dx.doi.org/10.1039/C9TC00291J>.
- [46] Holman GD, Park C. ACCELERATION OF RUNAWAY ELECTRONS AND JOULE HEATING IN SOLAR FLARES. 1985;191–196.
- [47] Chen L, Yin X, Fan X, et al. Mechanical and electromagnetic shielding properties of carbon fiber reinforced silicon carbide matrix composites. *Carbon N. Y.* [Internet]. 2015;95:10–19. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2015.08.011>.
- [48] Liu Y, Zhang Z, Xiao S, et al. Preparation and properties of cobalt oxides coated carbon fibers as microwave-absorbing materials. *Appl. Surf. Sci.* [Internet]. 2011;257:7678–7683. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.04.007>.
- [49] Gao X, Wu X, Qiu J. High Electromagnetic Waves Absorbing Performance of a Multilayer-Like Structure Absorber Containing Activated Carbon Hollow Porous Fibers–Carbon Nanotubes and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles. *Adv. Electron. Mater.* 2018;4:1–7.