

BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA DO GRAFENO INCORPORADO EM SUBSTRATOS FLEXÍVEIS

Emerson Cardoso de Sousa (IC) e Lúcia Akemi Miyazato Saito (Orientadora)

Apoio: PIBIC MackPesquisa.

RESUMO

Neste trabalho, foram realizados estudos em filmes compósitos com grafeno incorporado em polímero com a finalidade de blindar as ondas eletromagnéticas. Os testes foram realizados em duas montagens, guia de ondas metálico e antenas tipo corneta, ambas utilizando a faixa de frequência de 9 a 11 GHz (banda X). Na configuração utilizando o guia de ondas, a amostra de grafeno apresentou o parâmetro S21 na faixa de 20 ± 10 dB.

Com as antenas, a medida de S21 foi em torno de 15 ± 5 dB.

Palavras-chave: blindagem eletromagnética, grafeno

ABSTRACT

In this work, the graphene was incorporated into the polymer as a composite film with the purpose to shield the electromagnetic waves. The tests were done in two setups: metallic waveguide and by using the horn antennas, both of them using frequency between 9 at 11 GHz (X band). In the setup using the waveguide, the graphene sample presents the S21 parameter around 20 ± 10 dB. In the antenna configuration, the measure of S21 ranged around 15 ± 5 dB.

Keywords: electromagnetic shielding, graphene.

1. INTRODUÇÃO

A cada dia que se passa, o crescimento tecnológico aumenta exponencialmente e com ele vem a preocupação com a segurança do ser humano. Com o intenso crescimento da taxa de transmissão de dados e inúmeros dispositivos de comunicação, é preocupante o aumento da exposição dos seres humanos a imensa quantidade de ondas eletromagnéticas que são altamente prejudiciais principalmente sob intensidades altas ou por longo período de tempo. Por isso, observa-se a importância da blindagem eletromagnética desde solucionar problemas de interferências até a proteção e preservação da saúde.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo de blindagem eletromagnética está sendo de grande valia no nosso cotidiano devido ao avanço tecnológico rotineiramente, contudo nenhum usuário de aparelho eletrônico quer que seu dispositivo tenha algum tipo de interferência eletromagnética, impossibilitando de acessar algum conteúdo desejável ou até mesmo fazer uma ligação.

Atualmente o material mais utilizado para blindagem eletromagnética são os metais devido suas respectivas propriedades, este apresenta desvantagens como alta densidade e susceptibilidade à corrosão. Estão sendo realizadas diversas pesquisas com diferentes tipos de materiais para substituir o metal.

Por exemplo o grafeno, é um material com a espessura de um átomo e com ótimas propriedades como alta condutividade, flexibilidade, resistência mecânica, estrutura planar e entre outros. Imagina-se daqui alguns anos você podendo pegar seu celular com a espessura de uma folha sulfite, podendo dobrá-lo, guardá-lo, com uma alta velocidade de processamento e alta durabilidade de bateria.

Estudos feitos mostram a grande vantagem da troca do metal para a utilização do grafeno na blindagem eletromagnética, no decorrer do projeto foram abordados outros trabalhos já realizados que mostram com um olhar mais técnico essa grande novidade.

Investigando os projetos realizados, utilizaram grafeno com algum determinado polímero que obteve ótimos resultados. A partir disso houve interesse em trabalhar com grafeno incorporado no polímero.

O artigo (ACQUARELLI, 2014) foi analisado a blindagem eletromagnética de filmes a base de grafeno que neste caso foram nano-plaquetas de grafeno (GNP), utilizando uma técnica de pulverização (spray) adaptado as aplicações industriais, o objetivo do projeto é investigar a viabilidade de filmes de blindagem EM finos feitos por deposição por pulverização de uma suspensão de nano-plaquetas de grafeno (GNP) (ACQUARELLI, 2014).

As suspensões foram produzidas em diferentes concentrações e comparados com filmes de nanotubos de carbono (CNT) produzido nas mesmas condições. As nanoplaquetas de grafeno tem espessura de 3 – 8 milímetros e com eficácia de blindagem até 18 GHz. Os resultados de blindagem do GNP foram superiores comparada com nanotubos de carbono com multicamadas (MWCNTs), outro ponto importante analisado foi que após o recozimento térmico a 250°C o filme GNP apresentou seus valores de blindagem triplicados em escala linear atingindo até 30,6 dB.

Os GNPs são nanoestruturas de carbono constituídas por pequenas pilhas de grafeno, com espessura na faixa de 1 até algumas dezenas de nanômetros e dimensões laterais variando em alguns micrômetros até em centenas de micrômetros, os mesmos foram produzidos por esfoliação térmica (ACQUARELLI, 2014).

A deposição do filme foi realizada através de um substrato de vidro, antes de iniciar o processo o vidro é limpo e coberto com uma película polimérica removível. O número de ciclos de pulverização é N_{dep} . As suspensões GNP e MWCNT foram produzidas em duas concentrações de 0,5 mg/ml e 1 mg/ml e os ciclos de deposição de pulverização foram iguais a 10 e 15.

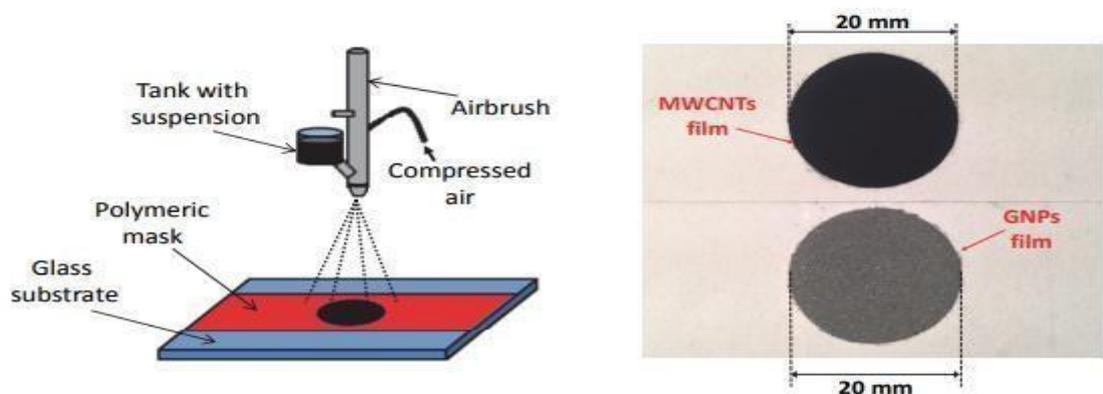


Fig.1 - (a) Esboço do sistema de pulverização e (b) imagens do MWCNT (topo) e os filmes GNP (inferiores) produzidos com suspensão a uma concentração de 1 mg/ml e para $N_{dep} = 10$. (ACQUARELLI, 2014)

A morfologia da amostra foi analisada através de microscopia de varredura eletrônica, a figura 3 mostra as suspensões de GNP e MWCNTs cujo a concentração é de 0,5 mg/ml e o $N_{dep} = 10$.

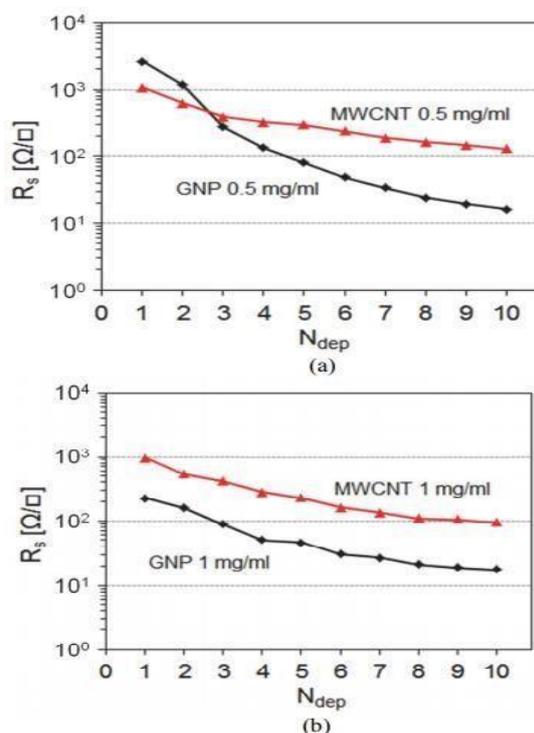


Fig.2 - Resistência de folha do GNP e MWCNT filmes obtidos a partir de suspensões em 0,5 mg/ml (a) e 1 mg/ml (b), como número de spray deposições. (ACQUARELLI, 2014)

O setup realizado para análise de blindagem eletromagnética consiste em:

- Um analisador de rede vetorial (VNA), Agilent N5245A, 10 MHz-50 GHz;
- Um par de cabos coaxiais blindados duplos de 50 Ω ;
- Um suporte de amostras coaxiais com flange (FCSH), modificado versão da célula coaxial descrita no padrão ASTM D4935.

Para se ter uma análise mais aprofundada da homogeneidade das respectivas amostras foram medidos o R_s em 5 posições diferentes para abranger a área total das amostras em diferentes concentrações e N_{dep} . Sendo assim foram montadas as tabelas com seus valores de R_s , blindagem e com os desvios padrões.

TABELA I. Resistência de folha (R_s) e eficiência de blindagem (SE) de filmes de GNP e MWCNT ($N_{dep} = 10$), (ACQUARELLI, 2014)

Filmes	$R_s[\Omega/\square]$	SE_0 [dB]	SE_{0max} [dB]	SE_{0min} [dB]	SE_{AV} [dB]	SE%
GNP - 0.5 mg/ml	20.5 ± 2.0	20.2	21.0	19.4	19.9	3.4%
GNP - 1 mg/ml	25.8 ± 6.9	18.4	20.8	16.6	17.8	6.7%
MWCNT - 0.5 mg/ml	153.4 ± 15.0	7.0	7.5	6.5	6.4	6.7%
MWCNT - 1 mg/ml	117.8 ± 23.7	8.3	9.5	7.4	8.5	2.3%

TABELA II. Resistência de folha (R_s) e eficiência de blindagem (SE) de filmes de GNP e MWCNT ($N_{dep} = 15$), (ACQUARELLI, 2014).

	GNP - 1 mg/ml		MWCNT - 1 mg/ml	
	Antes do recozimento	Depois do recozimento	Antes do recozimento	Depois do recozimento
$R_s[\Omega/\square]$	18.4 ± 4.9	5.7 ± 1.5	75.3 ± 15.1	68.6 ± 13.8
$SE_0[\text{dB}]$	21.0	30.6	10.9	11.5
$SE_{0max}[\text{dB}]$	23.5	33.2	12.3	12.9
$SE_{0min}[\text{dB}]$	19.2	28.7	9.8	10.3
$SE_{AV}[\text{dB}]$	<i>n. d.</i>	31.4	<i>n. d.</i>	11.4
$\mathcal{E}_{SE\%}$	<i>n. d.</i>	9.6%	<i>n. d.</i>	1.1%

n. d.: não disponível

O SE_0 que está na tabela é calculado para o caso de um escudo condutor eletricamente fino pela fórmula:

$$SE_0 = 20 \log_{10} \left(1 + \frac{\eta_0}{2R_s} \right) \quad (1)$$

No qual η_0 é a impedância da onda de espaço livre e o R_s utilizado é o seu valor médio.

O erro entre o medido e o SE_0 calculado é estimado pela fórmula:

$$\mathcal{E}_{SE\%} = 100 \frac{\left| 10^{SE_0/20} - 10^{SE_{av}/20} \right|}{10^{SE_0/20}} \quad (2)$$

Sendo assim analisando os valores da tabela com o gráfico montado Fig.8. (a) e (b) tiveram coerência com os resultados obtidos, quando aumentado a concentração diminuía a eficiência de blindagem mínima e máxima. Essa diminuição na amostra de GNP é ocorrida devida ao aumento de concentração do solvente que limita o processo de esfoliação de processo de sonicação, com isso as plaquetas obtidas são mais espessas sendo mais submetida a agregados formados durante a pulverização e filme deposição, com a consequente deterioração da amostra causando uniformidade.

Este efeito também é confirmado pela tendência do R_s medido em função do número de ciclo de pulverização (ACQUARELLI, 2014). Por outro lado, o erro percentual para o filme de MWCNT com concentração de 0,5 mg/ml é maior, isso ocorre devido a morfologia do filme que não depende da concentração.

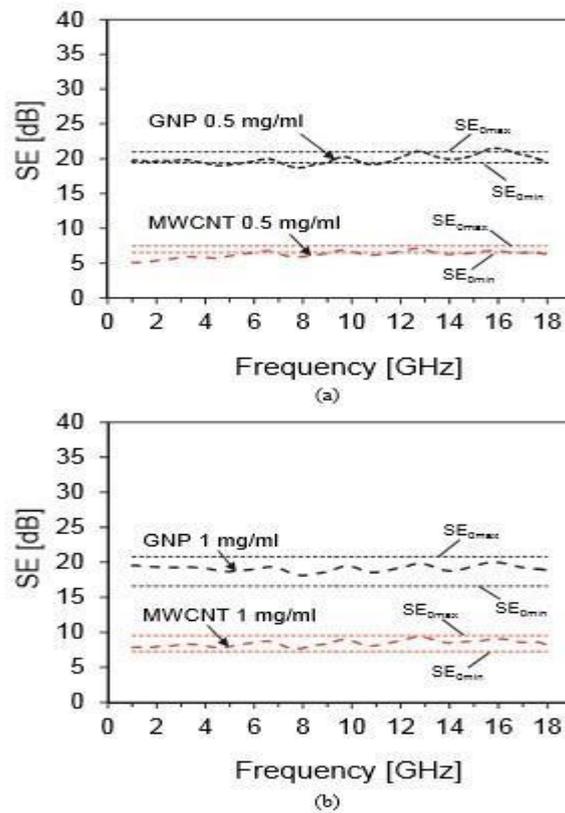


Fig.3 - SE medido dos filmes produzidos MWCNT e GNP, feitos com suspensão carregada a 0,5 mg/ml (a) e 1 mg/ml (b), para $N_{dep} = 10$. (ACQUARELLI, 2014)

E após o recozimento térmico a 250 °C teve um significativo aumento na blindagem eletromagnética devido a evaporação das moléculas solventes presas dentro da estrutura do filme, com a blindagem do filme de GNP e MWCNT na concentração de 1 mg/ml e com $N_{dep} = 15$ mostram um aumento de SE de 21,0 dB para 30,6 dB e de 10,9 dB para 11,5 dB, respectivamente.

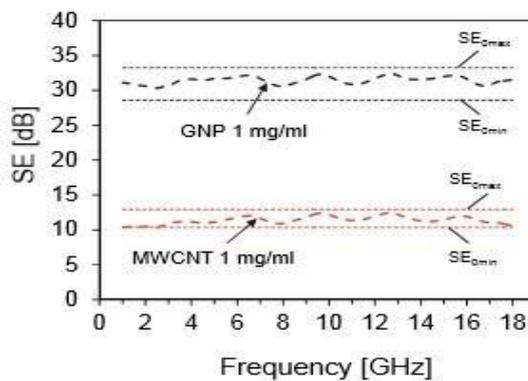


Fig.4 - SE medido após o recozimento térmico de filmes MWCNT e GNP obtido a partir de suspensão carregada a 1 mg / ml com $N_{dep} = 15$. (ACQUARELLI, 2014)

Dessa forma com esse trabalho realizado foi possível observar outros tipos de técnicas para a produção dos filmes sendo ele a base de grafeno (GNP) comparado com nanotubos de carbono (MWCNT) utilizando o mesmo solvente para ambos (1-propanol), acompanhado com os seus respectivos resultados antes e depois de fazer o recozimento térmico que foi o

diferencial para o aumento da eficiência de blindagem e para a diminuição da resistência de folha. Destacando outro ponto importante foi o baixo custo da produção dos filmes e altamente escalável em superfícies grandes.

Como foi citado acima os resultados com filme a base de grafeno e seus ótimos resultados obtidos, o grafeno ele está sendo um material bastante utilizado no ramo da pesquisa devido suas propriedades intrínsecas que são altamente condutivos, flexível, resistência mecânica, estrutura planar e entre outros. O artigo (HONG, 2012) nos mostra essa vasta qualidade do mesmo, para este o grafeno obtido foi a partir do processo de deposição de vapor (CVD).

No artigo (HONG, 2012) foi estudado o grafeno CVD comparado com o ouro utilizado para um estudo de eficiência de blindagem eletromagnética (EMI). Contudo existiram duas configurações para que foi feito o teste a primeira (I) utilizou-se um guia de onda que pode isolar o ambiente de medição de todos outros RF externos e a segunda (II) com antenas uma sendo transmissora e a outra receptora da onda eletromagnética a fig.9 mostra o esquema, para a primeira configuração a faixa de frequência utilizada foi de 2,2 – 7 GHz e para segunda configuração a frequência analisada foi 2 GHz, as frequências utilizadas foram as que obtiveram os melhores resultados para este estudo.

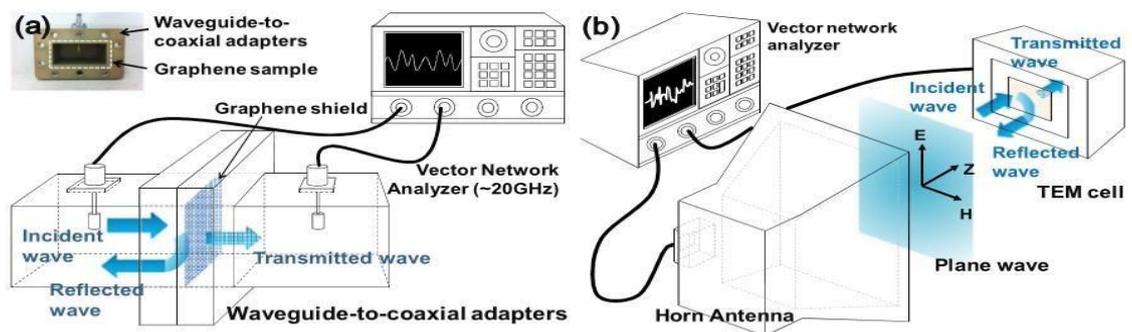


Fig.5 - Desenhos esquemáticos da configuração de medição para a interferência eletromagnética blindagem eficácia de grafeno. (a) sistema de medição guia de onda (faixa de frequências: 2.2 – 7 GHz) com dois adaptadores guia de onda coaxial e um analisador de rede vetorial. O tamanho do escudo grafeno no guia de onda é de 8,6 cm x 4.3 cm. (b) configuração de medição usando uma antena de chifre, uma célula de modo eletromagnético transversal (tem) e um analisador de rede vetorial. Nesta medição, utiliza-se uma única frequência de 2 GHz. (HONG, 2012)

Assim sendo destaca-se a grande importância da qualidade do grafeno para a obtenção de grandes resultados, desse modo foram feitos dois filmes de grafeno um de ótima qualidade com $R_s = 635 \text{ ohms/sq}$ e outra com qualidade inferior com $R_s \sim 2,3 \text{ kohms/sq}$. Todavia foram analisados os resultados da blindagem eletromagnética observando sua eficiência de blindagem (SE), absorção (AL) e reflexão (RL), observe a fig.10. O parâmetro utilizado para absorção foi o S_{21} , para reflexão S_{11} e para calcular SE utilizasse a fórmula $SE = -10 \log_{10} |T|$ (dB) onde T é a transmissão $T = |S_{21}|$.

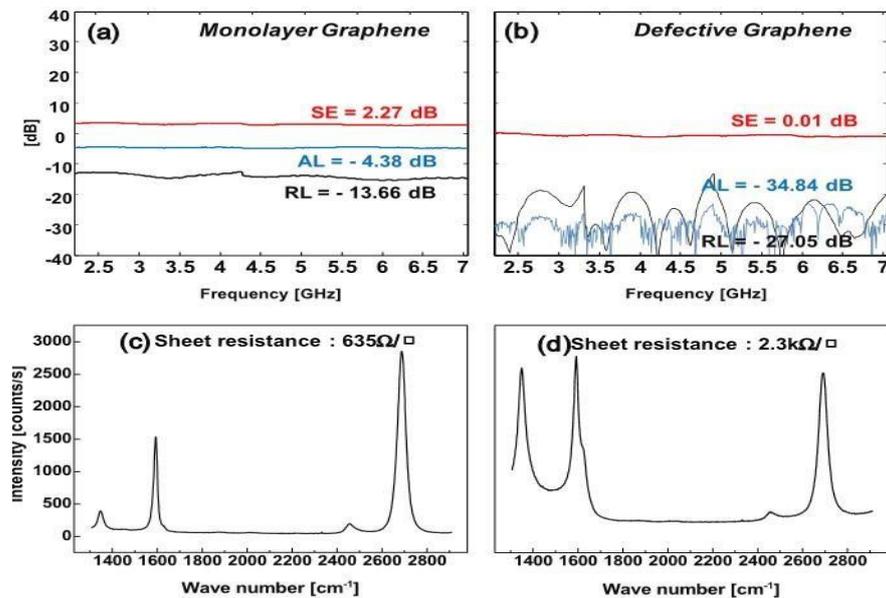


Fig.6 - A eficácia de blindagem (SE), perda de absorção (AL) e perda de reflexão (RL) de (a) um grafeno monocamada e (b) grafeno defeituoso. A medição foi feita em uma faixa de frequência de 2,2 a 7 GHz pela medição do guia de onda. (c), (d) espectroscopia Raman de grafeno correspondente aos resultados de (a) e (b), respectivamente. (HONG, 2012)

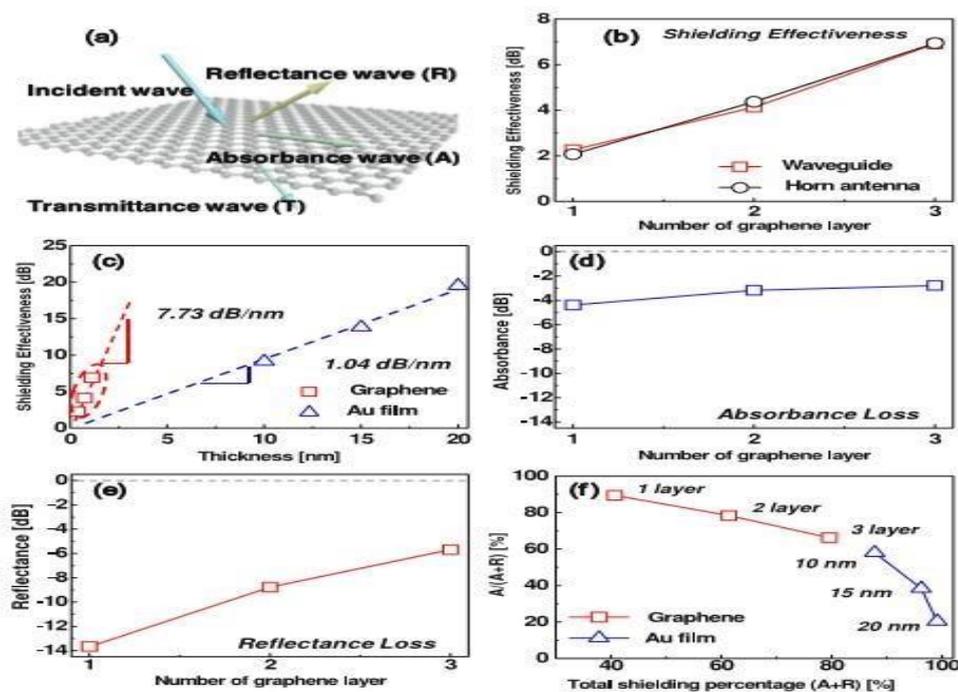


Fig.7 - (a) descrição da dispersão das ondas em grafeno. (b) a média se de grafeno em função do número de camadas grafeno. A medição foi realizada usando ambos o guia de onda com faixa de frequência de 2,2 a 7 GHz e sistemas de antena de chifre com uma única frequência de 2 GHz. Comparação do se entre grafeno e filme fino de ouro. (d) a perda de absorção e (e) reflexão perda de grafeno para diferentes números de camadas grafeno. A medição foi feita por um sistema guia de onda. (f) a porcentagem de absorção na blindagem total versus porcentagem total de blindagem para diferentes números de camadas grafeno e espessura de filme de ouro.

Outro ponto de bastante importância analisado foi que o grafeno quando se aumentava as camadas aumentava sua eficiência de blindagem, foram obtidos os resultados duas e três

camadas, respectivamente são 4,13 dB e 6,91 dB, utilizando a segunda configuração da antena obtivera resultados bem próximos.

O filme de ouro como é difícil formá-lo uniformemente mais fino do que 10 nm pelo processo de deposição de evaporação o filme utilizado é de 10 nm. Foi feita a mesma análise de espessura para sua eficiência de blindagem para os filmes de ouro com três espessuras diferentes 10, 15 e 20 nm, os resultados de SE foram respectivamente 9,11 dB, 13,8 dB e 19,51 dB. Ressaltando que o teste feito com o grafeno de camada tripla tem aproximadamente 1 nm e o seu valor de SE ficou semelhante ao do filme de ouro de 10 nm. Dessa maneira observando a inclinação da curva na figura 3(c) o valor SE por unidade de espessura é 7,73 dB/nm e 1,04 dB/nm para grafeno e filme de ouro, respectivamente. Dessa maneira confirmamos a quão qualidade do grafeno tendo mais de sete vezes (em termos de dB) maior SE eficiência de blindagem que o filme de ouro. O SE da monocamada ideal de grafeno é de 16,5 dB, melhor dizendo a única camada de grafeno sem defeito ou rugas pode bloquear até 97,8% de EMI (HONG, 2012).

Os cálculos de eficiência de blindagem de absorção (SE_A), reflexão (SE_R) e total (SE_T) devem ser realizados da seguinte maneira (SANTANA, Giovani).

$$SE_A [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2} \right) \quad (3)$$

$$SE_R [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{1 - |S_{11}|^2} \right) \quad (4)$$

$$SE_T [dB] = SE_R [dB] + SE_A [dB] \quad (5)$$

Os mesmos quantificam o quanto a amostra é absorptiva ou reflexiva.

3. METODOLOGIA

Os objetivos foram analisar a eficiência de absorção e refletividade de filmes finos de polímero com grafeno CVD e óxido de grafeno reduzido. As análises do desempenho da blindagem eletromagnética foram realizadas numa faixa de frequências de 9 a 11 GHz nas configurações utilizando antena tipo corneta e guia de onda metálico.

Antes de analisar as amostras, testou-se a montagem que envolvia, *N9951A FieldFox Handheld Microwave Analyzer* 44 GHz (N9951A Analisador de Micro-ondas de Mão FieldFox 44GHz) e o kit Minipa modelo ED-3000. Conforme as figuras abaixo.

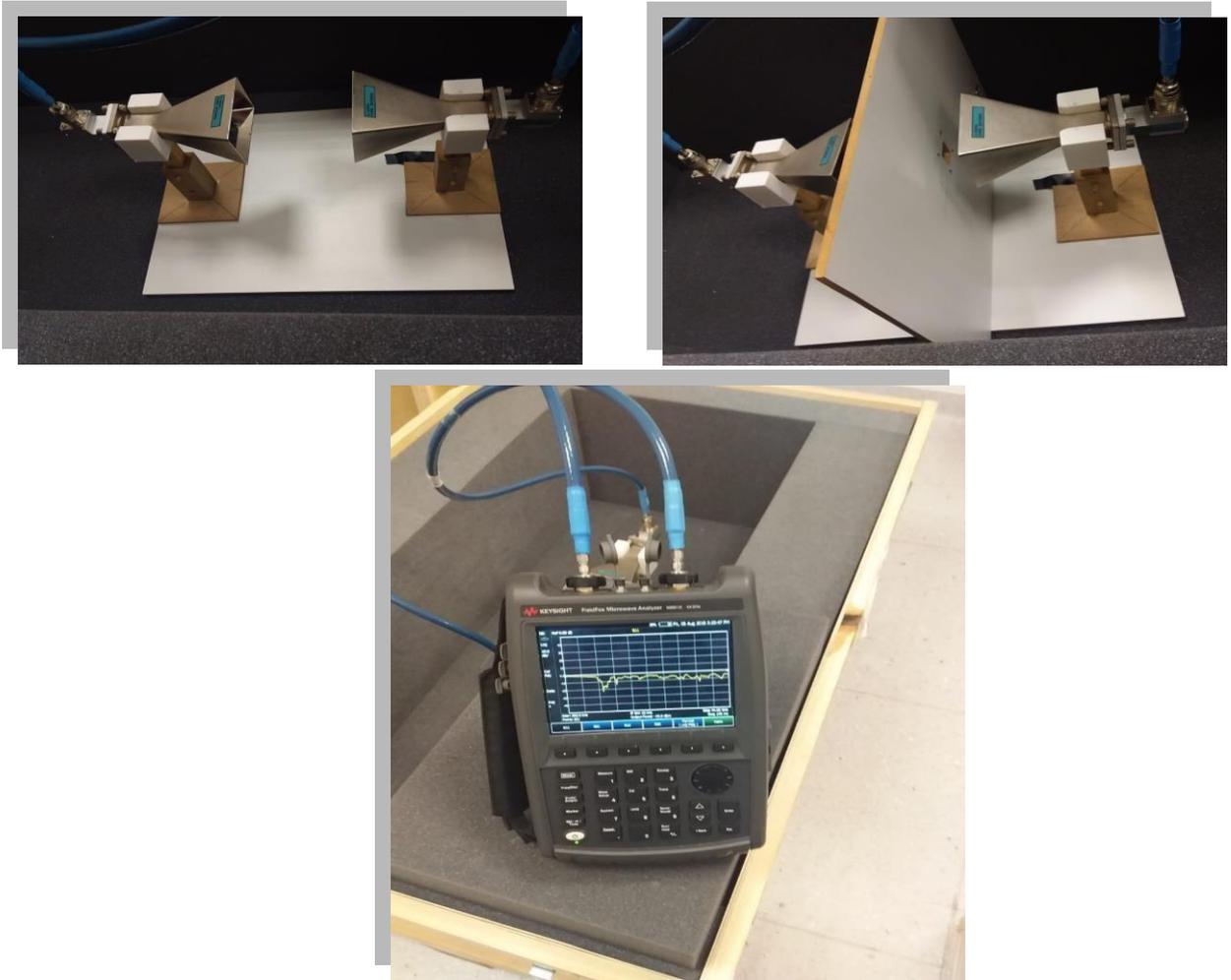


Fig. 8 – Montagem da configuração com as antenas e o equipamento *FieldFox Analyzer*.
Entre as duas antenas está o suporte para as amostras

Além disso, a problemática apresentada ao realizar os experimentos de blindagem eletromagnética, foi obter uma configuração confiável com uma banda de frequência maior. Para se obter essa melhora investigou-se os métodos de montagens utilizando antena e guia de ondas, mostrado nas figuras 9 e 10.

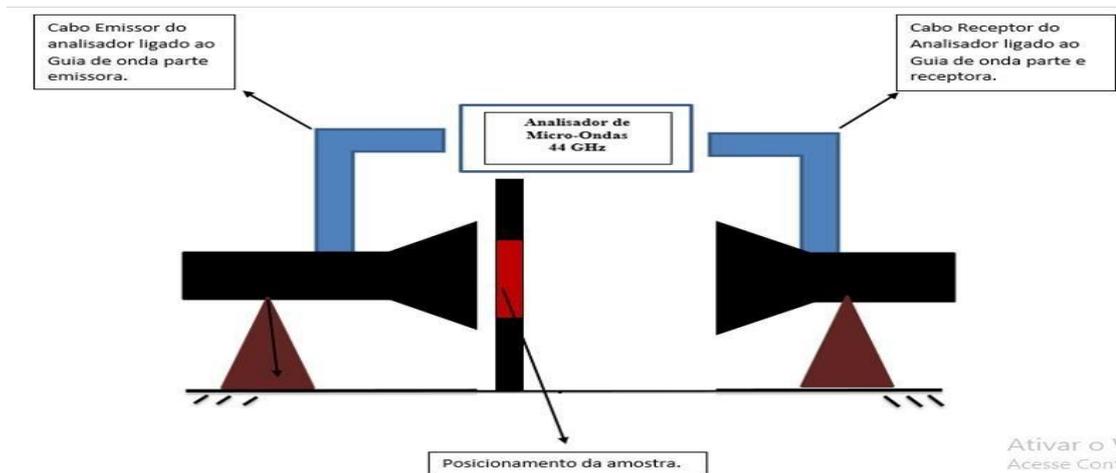


Fig.9 - Configuração antena

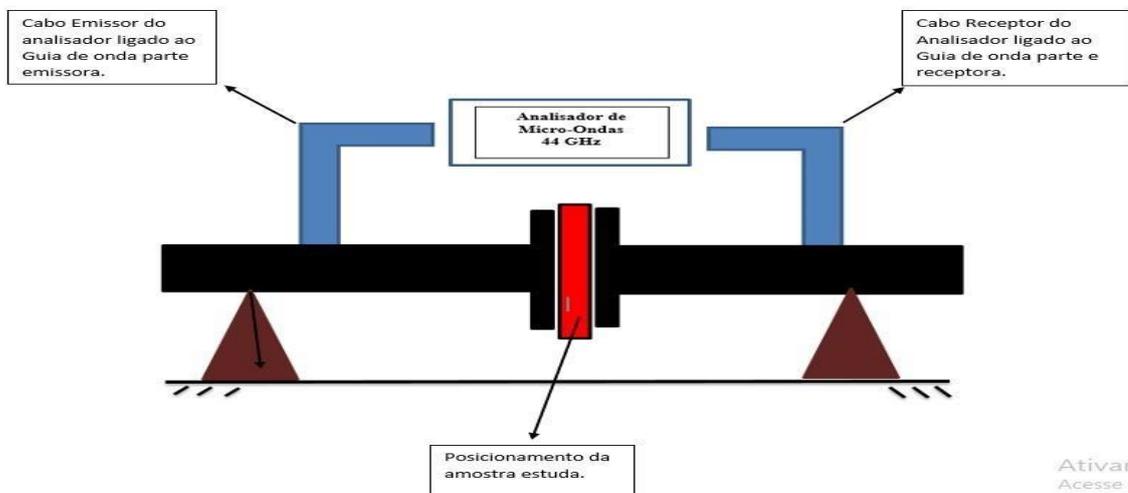


Fig.10 - Configuração guia de ondas

Portanto o objetivo do projeto foi averiguar, investigar, melhorar e caracterizar amostras com enfoque em grafeno incorporado no polímero, cada vez mais examinar os respectivos resultados e fazer um 'upgrade' no setup.

Atividades realizadas:

- I. Estudo das características elétricas das amostras a serem analisadas para se ter uma previsão dos resultados esperados ao realizar o experimento de blindagem.
- II. Montagem da configuração experimental e a análise da blindagem eletromagnética separando a parcela de absorção e refletividade.
- III. Medir e analisar a blindagem eletromagnética na faixa de 9 a 11 GHz.
- IV. Estudo das amostras de grafeno e suas propriedades elétricas quando incorporados em filmes finos de polímero.
- V. Instalação de software para o manuseio do equipamento FieldFox Analyser remotamente.

- VI. Estudo de artigos para basear a parte experimental e auxiliar na análise dos dados coletados.
- VII. Estudo das calibrações Mechanical e Normalization oferecida pelo equipamento *FieldFox Analyser*.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Inicialmente após os estudos dos artigos, foi realizada a parte experimental, para obter a confiança nas medidas calibrou-se o equipamento para validação dos dados, realizou-se a calibração em setups distintos com diferentes distâncias e ângulos, para conseguirmos chegar em conclusões das amostras que forem inseridas nesse contexto da calibração.

Entretanto fixou-se a antena de transmissão e variou-se a antena de recepção, por exemplo, o equipamento *FieldFox Analyzer* era conectado nas duas antenas, responsável pelas medições dos parâmetros S11 e S21. A antena de transmissão fixa e a de recepção em 10 cm no ângulo de 45°.

De acordo com esse setup coletou-se as medidas e logo após mudou-se a distância e o ângulo para demais medidas. Com isso foram escolhidos aleatoriamente os ângulos de 0°, 45° e 90° e as distâncias 0, 10 e 20 cm para se fazer os testes conforme a figura 11.

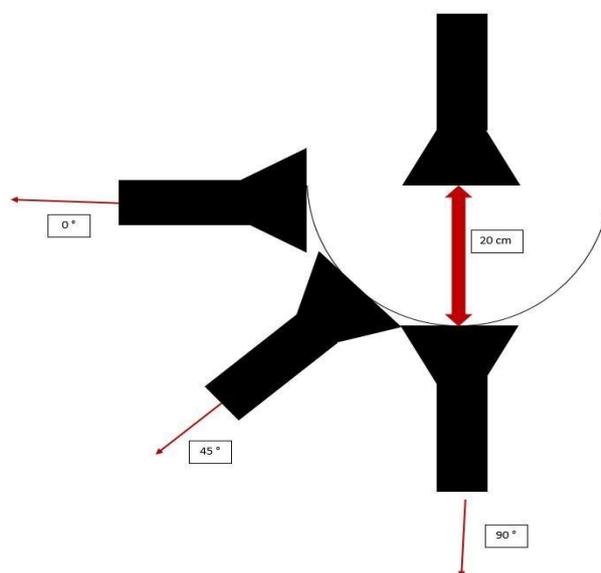


Fig.11 – Esquema das medidas que foram nos ângulos de 0°, 45° e 90°

Antes de qualquer medida se calibrou o equipamento *FieldFox Analyzer* na configuração do dispositivo chamada Normalization. Como referência do sistema calibrou-se na distância entre as antenas 20 cm e ângulo de 0°, ou seja, com visada direta.

A calibração Normalization normaliza o valor de atenuação sem amostra, ou seja, quando se realiza a medida na distância de 20 cm com visada direta das antenas, o sistema apresenta o valor de 20 dB de atenuação que não é um resultado esperado, porque quando

não se tem nenhuma amostra e as duas antenas estão em visada direta espera-se que a atenuação seja aproximadamente a zero que significa sem perda. Aplicou-se essa calibração que fixa o sistema na atenuação aproximadamente 0 dB.

Após as medições, selecionou-se os dados para análise, com auxílio do Origin conforme as figuras abaixo.

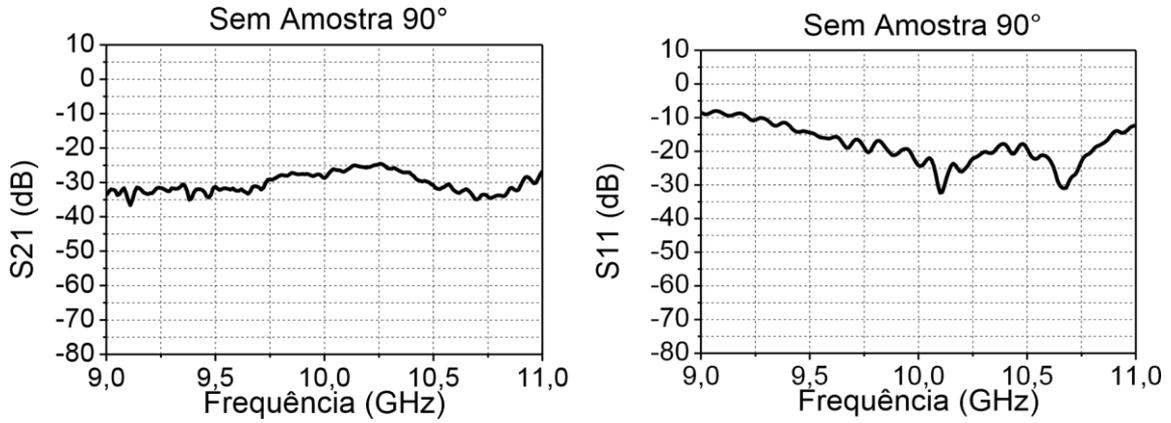


Fig.12 - Ângulo de 90° distância de aproximadamente 0 cm (parâmetros S21 e S11).

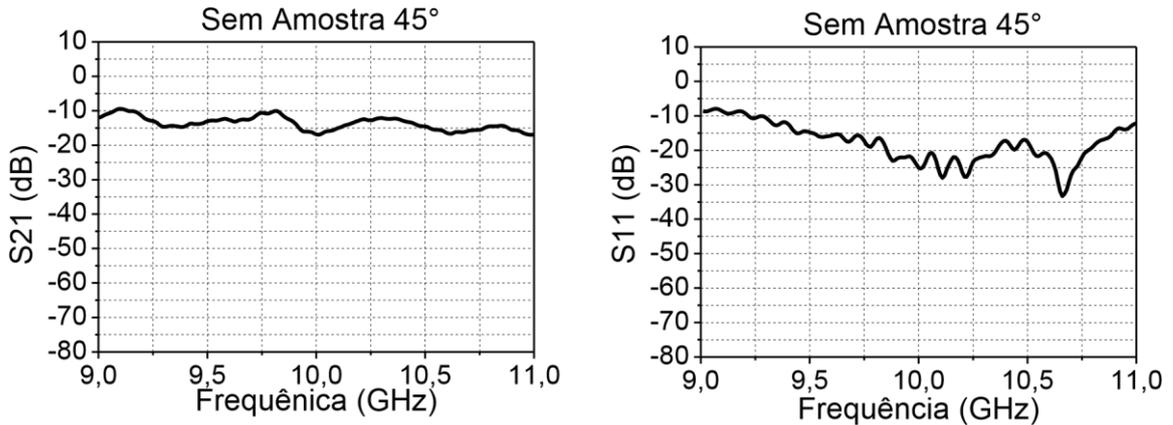


Fig.13 - Ângulo de 45° distância de aproximadamente 10 cm (parâmetros S21 e S11).

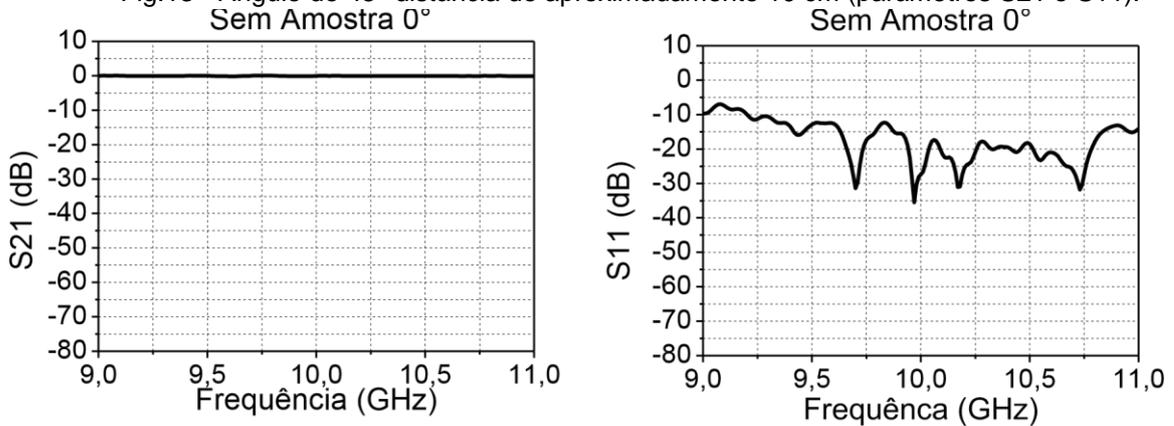


Fig.14 - Ângulo de 0° distância de aproximadamente 20 cm (parâmetros S21 e S11).

Analisando as medidas observou-se que para cada ângulo existe uma distância que melhor corresponde aos valores de transmissão, a figura 14 foi a que apresentou os melhores resultados que foi na distância de 20 cm, pois é a referência.

Ao mudar o ângulo para 45° devido as perdas não foi viável analisar a distância de 20 cm, pois a transmissão não apresentou bons resultados, ou seja, tudo que era transmitido pela antena de transmissão não era recebido pela antena de recepção, assim segue a mesma análise para o ângulo de 90°.

A cada ângulo alterado apresentava-se 10 dB de perda, essa perda é referente a uma parte da onda que é refletida devido a presença de outros aparelhos ao redor do experimento e por causa de direcionalidade das antenas, se uma antena não está alinhada com outra antena isso ocasionará perdas.

Notou-se também ao mudar o ângulo é necessário diminuir a distância entre antenas para a coleta, ou seja, para 0° entre as antenas obtêm-se um bom resultado na distância de 20 cm. Já para 45° a distância ideal foi de 10 cm e 90° distância de aproximadamente 0 cm.

Durante as análises constatou-se que a configuração no FieldFox com calibração Normalization não foi ideal segundo a figura 14, pois a perda na reflexão ainda era significativa. Com necessidade de aperfeiçoar mais o setup e melhorar as configurações no FieldFox, foi realizada a calibração indicada pelo fabricante chamada Mechanical que apresenta melhor confiabilidade, para realizá-la utilizou-se Keysight Cal Kit 85521A Type-3,5 mm (f) 50 Ω mostrado na figura 15.



Fig.15 – Keysight Cal Kit 85521A Type – 3,5mm(f) 50 Ω e FieldFox Analyzer

No FieldFox na parte de calibrações foi executado alguns passos que utilizam o Cal Kit, após realizado todos os passos, sendo o último passo conectar o cabo da porta 1 (entrada do analisador) um lado porta do *through* (no português ‘através’) e o cabo da porta 2 (saída do analisador) na outra extremidade do *through*, com isso observando a eficiência na calibração.

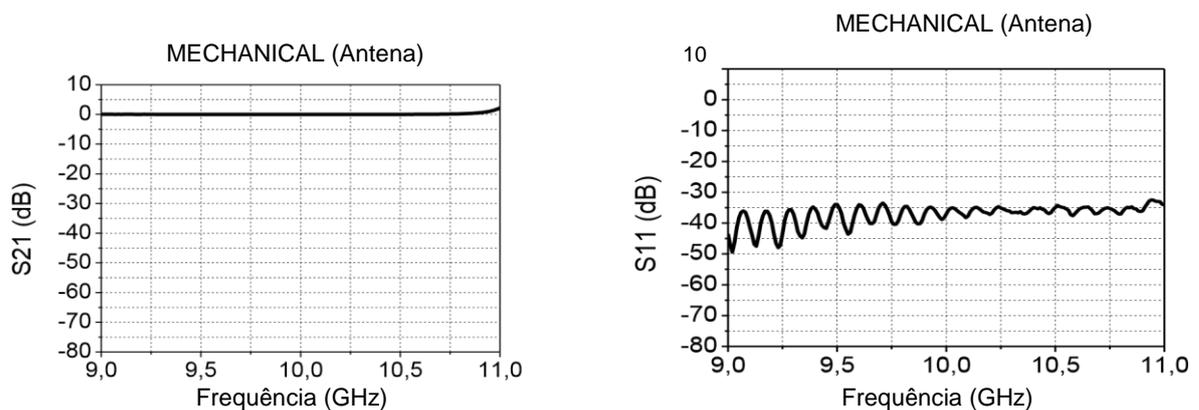


Fig.16 - Calibração com Cal Kit (parâmetros S21 e S11)

Estes foram os melhores resultados apresentados. Após a calibração, todo sinal transmitido foi recebido, pois o parâmetro S21 (transmissão) não apresentou nenhuma perda como previsto. Já no parâmetro S11, a reflexão muito baixa, isso quer dizer que o sinal que volta é pouco (aproximadamente -40 dB de retorno), conforme a figura 16.

Após realizado essa primeira parte, iniciou-se a análise das amostras inseridas. Nos testes em questão duas configurações foram utilizadas, antena e guia de ondas.

Em ambas configurações foi realizada a mesma calibração utilizando a função Normalization como já mencionada. No caso da transmissão os resultados foram iguais para os dois sistemas e o gráfico semelhantes como mostra na figura 14.

Neste artigo serão apresentadas duas amostras que são, papel alumínio que é comumente usado para manter a umidade do alimento e PLA com Grafeno. A primeira é bastante utilizada na área de blindagem eletromagnética devido a sua alta eficiência chegando acima de 100 dB a blindagem na frequência de 10 GHz (WEIBLER, Joseph).

Outra aplicação do alumínio foi para blindagem eletromagnética na frequência de 60 Hz em sala de exames de imagem por ressonância magnética (NAVET, Rafael) no qual obtiveram blindagem acima de 100 dB. Este teste foi realizado com uma chapa de alumínio com espessura de 0,5 mm.

A outra amostra, PLA com Grafeno, é um compósito em que mistura o filamento de PLA (poliácido láctico) com o filamento de Grafeno da BLACKMAGIC3. Este filamento de grafeno foi fabricado pelo Graphene 3D Lab que é comumente utilizado para criar sensores capacitivos em circuitos para usos em eletrônica entre outra gama de aplicação. E a mistura dos dois materiais foi feita por uma prensa na temperatura de 180°C com a pressão de 1 tonelada.

A partir disso, foram coletados os gráficos abaixo.

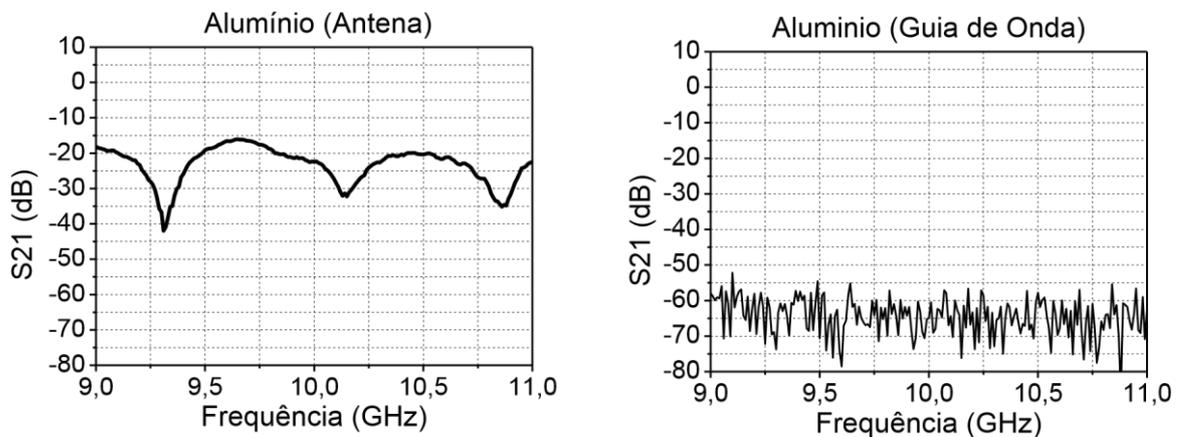


Fig. 17 – Amostra papel alumínio (Configuração antena e guia de onda respectivamente)

Logo de início percebe-se a grande diferença entre os resultados na antena e no guia de onda. Isso se deve ao fato que no guia de onda como o próprio nome já nos diz que a onda eletromagnética é guiada conforme mostra o esquema na figura 10. Na antena a onda passa pelo ar livre, com isso, perdas altas na transmissão, devido interferências no meio. O ideal, neste caso, é realizar os testes em uma câmara anecoica.

Para esta amostra na antena a atenuação foi de 30 ± 10 dB e para o guia 75 ± 15 dB para o parâmetro de transmissão (S_{21}), com espessura de 0,0067mm e resistência aproximadamente $0 \Omega/\square$.

Outro possível motivo para essa grande diferença na atenuação foram as dobras presentes no papel alumínio que resultou em maiores reflexões das ondas, no guia a amostra foi bem ajustada no meio dos dois guias de ondas com a distância aproximadamente zero entre os dois, na antena, por outro lado, a amostra teve um espaço aproximadamente zero em relação a antena de transmissão, já a distância entre as duas antenas foi de 20 cm, conforme a figura 9.

Para o caso do guia, o que influenciou nas medidas foi o manuseio do equipamento, ou seja, encaixe e desencaixe dos guias. Com isso, o aperto dos parafusos não são os mesmos.

Para a amostra de PLA com Grafeno há uma semelhança entre os resultados das duas configurações, como mostra a figura 18. Isso se deve ao fato de que a amostra é mais rígida, não ocasionando a dobra dela e imperfeições ao fazer os testes na troca de configurações.

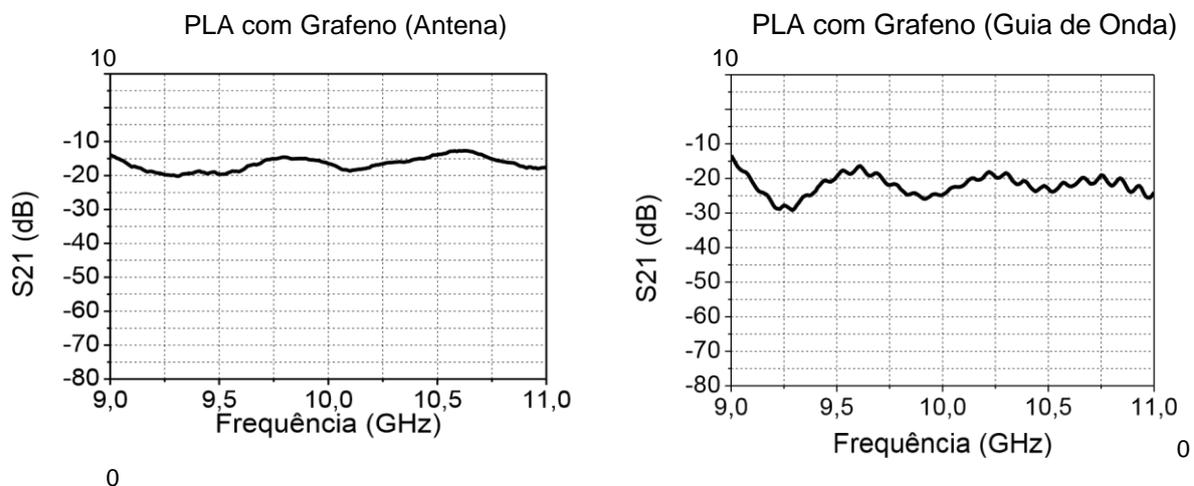


Fig.18 – Amostra de PLA com Grafeno (configuração antena e guia de ondas respectivamente)

Na antena a amostra apresentou atenuação de 15 ± 5 dB e para o guia 20 ± 10 dB para o parâmetro de transmissão, resistência do mesmo $34,22 \Omega/\square$. Ao observar o teste na antena não foram obtidas pequenas oscilações ao longo da antena, quando comparado com o guia. As oscilações apresentadas foram resultadas ao colocar a amostra no guia, onde foi necessário furar a amostra para encaixar os parafusos. Com isso tendo uma distância de aproximadamente 1 cm e a amostra de PLA com Grafeno com a espessura de 0,23mm, causando também maior distância.

Sendo assim, esse espaçamento ocasionou uma área de escape para as ondas eletromagnéticas, ou seja, quando a onda eletromagnética passava por essa junção uma parte era transmitida e outra refletida.

Por fim ao observar os resultados das duas amostras de PLA com Grafeno e papel alumínio conclui-se, que quanto mais condutor o material maior será sua permeabilidade magnética. Sendo assim, o material apresenta menor resistência e permite a passagem com maior facilidade da corrente elétrica induzida gerada por uma onda eletromagnética, e essa corrente induzida gera um campo eletromagnético contrário a esse aplicado, ocasionando a blindagem eletromagnética.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da proposta de projeto inicial, foi possível confirmar os mínimos detalhes que influenciam na medição da blindagem eletromagnética, como ambiente, aperto dos parafusos, conexões dos cabos, posicionamento da amostra e as diferentes configurações do equipamento FieldFox Analyzer.

Não foi possível a realização das deformações mecânicas nas amostras de Grafeno, pois a todo momento a grande preocupação além de fazer as medidas, era desenvolver uma montagem que apresentassem resultados confiáveis. A cada vez que se realizou as medidas, foram percebidas as interferências que estavam ocorrendo.

Logo no começo utilizou-se a mesa de metal para se fazer a coleta das medidas, com estudos realizados este local não era o melhor para se coletar os devidos dados, pois com a presença deste material ocasionava-se reflexões, que na maior parte das vezes não era do material.

Com o passar das análises, as técnicas se aprimoraram para configuração do FieldFox, no primeiro momento realizou-se adaptações no sistema para fazer a calibração Normalization. Neste caso para se fazer esta calibração é necessário de apenas conectar um cabo, onde sua entrada é na porta 1 e sua saída na porta 2. Ao invés de colocar o cabo inserimos o sistema, onde o resultado final foi a compensação da atenuação apresentada.

Outro tipo de calibração executada foi a Mechanical, que é recomendada pelo fabricante, onde foi necessário o manuseio do CalKit. Esta calibração foi a que apresentou melhores resultados com aproximadamente 0dB de atenuação para a transmissão (S21) e 40 dB de atenuação para reflexão (S11).

Foi possível perceber a semelhança dos resultados das amostras, tanto para montagem do guia de onda quanto para antena. Entretanto, como já mencionada as

atenuações do setup da antena dificultou a apresentação de resultados iguais a do guia de ondas.

Por fim foi analisado a necessidade do uso de câmara anecóica para blindagem das interferências externas, ou seja, um ambiente ideal para a coleta de dados. Outro ponto analisado seria o controle da montagem do setup de forma automática, evitando erro de operação de montagem.

6. REFERÊNCIAS

ACQUARELLI, C. et al. Graphene-based EMI shield obtained via spray deposition technique. Proc. of the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014), 2014.

Conductive Graphene Filament. BLACKMAGIC3D, 2019. Disponível em: <<https://www.blackmagic3d.com/>>. Acesso em: 24 de Agosto de 2019.

SANTANA, Giovanni et al. Blindagem eletromagnética em filmes poliméricos PET com grafeno na superfície. São Paulo, SP. 2017.

HONG, Seul Ki et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer graphene. Nanotechnology, 2012.

Kit de Treinamento em Microondas. Minipa, 2019. Disponível em: <http://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/ED-3000--SISTEMA-DE-TREINAMENTOEMMICROONDAS>. Acesso em: 24 de Agosto de 2019

MORARI, C. et al. Methods for determining shielding effectiveness of materials. Electrotehnica, electronica, automática, vol. 63 (2015), nr. 2.

MANIYARA, C. et al. An antireflection transparent conductor with ultralow optical loss (< 2 %) and electrical resistance (< $6\Omega\text{sq}^{-1}$). Nature Communications, 2016.

N9951A Analisador de Micro-ondas de Mão FieldFox, 44GHz. Keysight Technologies, 2019. Disponível em: <<https://www.keysight.com/pt/pdx-x205331-pn-N9951A/fieldfoxhandheld-microwave-analyzer-44-ghz?cc=BR&lc=por>>. Acesso em: 24 de Agosto de 2019.

NAVET. Rafael de Souza. Utilização de alumínio para blindagem de campo magnético de 60 Hz em sala de exames de imagem por ressonância magnética. Campinas, SP: [s.n.], 2018.

WEIBLER. Joseph. Properties of Metals Used for RF Shielding. USA. [s.n], 1993.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Eng. Marcelo Pereira e ao Prof. Dr. Marco Antônio Assis de Melo pelas discussões técnicas.

Contatos: emerson_ti_co@hotmail.com; lucia.saito@mackenzie.br