



ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS ABSORVEDORES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA (MARE) EM MICRO-ONDAS

Heitor G. da Costa¹², Gustavo F. Vicentine¹², Marco Antonio B. Pinto¹², Raimundo Eider F. Sobrinho¹², Charles Artur S. de Oliveira¹², Alexandre M. de Oliveira¹².
{heitor, gustavo, m.antonio, raimundo, charles, amanicoba}@labmax.org

¹ Instituto Federal de São Paulo, campus Cubatão, São Paulo, Brasil.

² Laboratório Maxwell de Micro-ondas e Eletromagnetismo Aplicado (LabMax).

Resumo - No presente trabalho são apresentadas técnicas de medições em placas absorvedoras de micro-ondas, promovendo um estudo comparativo entre métodos ressonantes, como linha de transmissão/reflexão, sonda coaxial, espaço livre, arco NRL e seção reta radar (RCS). As informações foram obtidas através das informações levantadas na literatura. Com isso, pode-se concluir que as técnicas distinguem-se por aplicações de diferentes materiais, frequência de atuação, disponibilidade de recursos e propriedades de interesse.

Palavras-chave: Compatibilidade eletromagnética; Espalhamento de radiação eletromagnética; Parâmetros S; Propriedades constituintes; Refletividade.

1. INTRODUÇÃO

No cenário de Compatibilidade e Interferência Eletromagnética (CEM), o estudo de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) tem se tornado uma área muito promissora para o desenvolvimento de novas tecnologias. Essas que, por sua vez, possuem papéis importantes, sendo aplicadas em equipamentos eletroeletrônicos, setores de telecomunicações, medicina e indústrias militares [1], [2] e [3].

O MARE pode ser caracterizado através de suas propriedades complexas, dadas pela permissividade e permeabilidade relativa. Através desses dados é possível calcular a eficiência de absorção dada pela atenuação da reflexão do absorvedor [1], apresentado na Tabela 1.

TABELA 1 – Relação entre atenuação e taxa de absorção de uma MARE.

Atenuação da radiação (dB)	Taxa de Absorção da radiação (%)
0	0
-3	50
-10	90
-15	96,9
-20	99
-30	99,9
-40	99,99

Tabela formulada a partir das referências [1], [3] e [4].

Para todas as técnicas apresentadas nesse trabalho, emprega-se o uso de um analisador de redes vetoriais (VNA), que a partir da leitura dos sinais TX e RX, são calculadas as propriedades constituintes do absorvedor.

O seguinte trabalho, tem por objetivo reunir e apresentar diferentes técnicas para a avaliação de MARE em frequência de micro ondas, dando ênfase em medidas de caracterização não ressonantes. Através das informações apresentadas, espera-se entender as distinções entre os métodos empregados para a caracterização de absorvedores, sendo possível selecionar a técnica que melhor for adequada à ocasião.

Este artigo está estruturado em quatro seções. Na Seção 1, é apresentado a introdução do trabalho, na Seção 2, o desenvolvimento, na Seção 3 são expostos os resultados comparativos entre as técnicas, e por fim na Seção 4, é apresentado a conclusão.

2. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do trabalho foi organização em quatro sub seções. Inicialmente, na sub seção I, é apresentado o conceito dos MARE, na sub seção II, são abordadas as metodologias de caracterização, na sub seção III são abordados os métodos ressonantes, e por fim, na sub seção IV são tratados os métodos não ressonantes.

I. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE)

Os MARE são materiais formados a partir de compostos dielétricos e/ou magnéticos, capazes de promover, em determinadas frequências, a dissipação de energia da radiação eletromagnética em calor [1] e [4]. Portanto, como cada absorvedor possui sua composição, as técnicas empregadas para a avaliação poderão variar de acordo com a faixa da frequência de interesse, homogeneidade e dimensões da amostra, compatibilidade em altas temperaturas, entre outros fatores [2], [5], [6].

II. Metodologia de Caracterização

Através do princípio de conservação de energia, visto na Figura 1, é sabido que uma onda eletromagnética incidente em um MARE pode ter parte da sua energia refletida, absorvida, dissipada e transmitida, [4] e [7]. Devido a isso, técnicas de caracterização são empregadas para avaliar o desempenho o absorvedor, envolvendo os parâmetros S e medidas de refletividade. Os parâmetros S são basicamente constituídos por uma matriz que engloba as propriedades do espalhamento eletromagnético, que por sua vez, representam as energias refletida e transmitida (S_{11} e S_{21}), correlacionadas com as propriedades constituintes (permissividade e permeabilidade). Em medidas de refletividade, é possível obter dados como a perda por reflexão (dB) em diferentes ângulos de incidência.

Em frequências de micro-ondas, os métodos para caracterização são classificados em duas categorias, métodos ressonantes e não ressonantes [5].

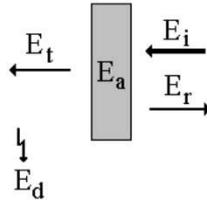


Figura 1 – Exemplo do princípio da conservação de energia da onda eletromagnética incidente. E_i – Energia incidente, E_t – Energia transmitida, E_r – Energia refletida, E_d – Energia dissipada, e E_a – Energia absorvida pelo MARE [7].

III. Métodos ressonantes

Geralmente, os métodos ressonantes são capazes de oferecer medidas com maiores precisões na caracterização do MARE, através de suas propriedades constituintes em uma estreita faixa de frequências [3], [5] e [6]. Para isso, é utilizado um VNA, que fornecerá as características do absorvedor. Dentre os parâmetros utilizados para se conhecer essas propriedades constituintes, são levadas em consideração as características, como fator Q (fator qualidade do dielétrico, correspondente ao inverso da tangente de perdas), volume e frequência ressonante.

Atualmente há diferentes técnicas ressonantes disponíveis, como por exemplo, cavidades reentrantes, ressonadores de cavidade, ressonadores de cilindro dividido, ressonadores Fabry-Perot, entre outros [6].

As medidas ressonantes podem ser avaliadas por duas maneiras. O método de perturbação é empregado quando trata-se de medições da permissividade de materiais, absorvedores com médias e altas perdas, e materiais magnéticos. No caso de materiais com baixas perdas, o método utilizado é conhecido como método de medição de baixa perda, empregando o uso de amostras maiores.

IV. Métodos não-ressonantes

Diferente das medidas ressonantes, os métodos não ressonantes possibilitam análise do comportamento do MARE em grandes faixas de frequências. Além disso, nos métodos não ressonante, são incluídas as medidas de reflexão e transmissão/reflexão, onde as propriedades complexas são extraídas por meio dos parâmetros S, ou pela reflexão da radiação eletromagnética incidente [5], determinando a perda por refletividade do MARE, com o uso de um VNA.

Alguns exemplos de técnicas não ressonantes na faixa de micro-ondas, são conhecidas como linha de transmissão/reflexão, sonda coaxial, espaço livre, arco NRL e seção reta radar (RCS), que serão explicadas nos próximos tópicos.

- *Linha de Transmissão/Reflexão*

Na técnica de linha de transmissão/reflexão, apresentada na Figura 2, emprega-se o uso de um guia de ondas ou linha coaxial. Para o ensaio, a amostra deve ser preparada e encaixada na seção da linha de transmissão, e a partir das configurações das portas ligadas ao VNA, são fornecidos os parâmetros S (S_{11} e S_{21}) do MARE. Após isso, é possível calcular as

permissividade e permeabilidade complexas da amostra. Contudo, a desvantagem apresentada nessa técnica é a preparação da amostra, a fim de que não haja interferências com o meio externo, resultantes por lacunas de ar localizadas entre a superfície da amostra e a linha de transmissão.

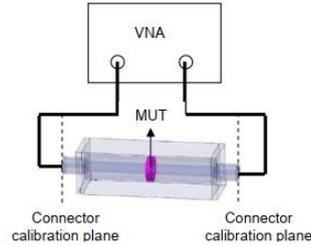


Figura 2 – Técnica de caracterização eletromagnética de um material em teste (MUT), utilizando guia de ondas [6].

- *Sonda Coaxial*

Com método da sonda coaxial é possível se obter os valores da permissividade elétrica relativa e o fator de perdas dielétricas do absorvedor, [3]. A técnica baseia-se na extremidade da sonda pressionada ou imersa em uma amostra, exibido na Figura 3. A partir disso, uma radiação eletromagnética é aplicada no MARE, e então é obtido o coeficiente de reflexão, que por sua vez, é utilizado para o cálculo da permissividade elétrica da amostra.

Assim como a técnica linha de transmissão/reflexão, as lacunas de ar podem gerar interferências, comprometendo o ensaio.

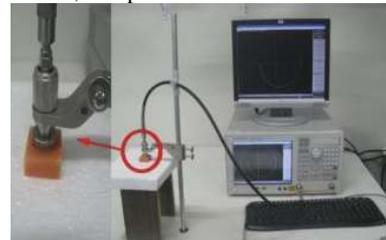


Figura 3 – Setup utilizando o técnica da sonda coaxial [3].

- *Espaço Livre*

Para a realização dessa técnica, são utilizadas duas antenas, de forma que são apontadas uma para a outra, enquanto a amostra é posicionada em um suporte no meio do percurso, como na Figura 4.

Essa técnica permite caracterizar a amostra sem que haja a necessidade de contato físico, o que possibilita ensaios em temperaturas elevadas, ou em ambientes com condições hostis [6]. Além da possibilidade do ensaio contemplar longas faixas de frequências, o método oferece as medidas dos coeficientes de reflexão e transmissão, obtidos pelos parâmetros S_{11} e S_{21} , para posteriormente calcular-se as propriedades complexas da amostra.

Nessa técnica, o VNA pode ser calibrado por diferentes métodos, como TRL (Through-Reflect-Line), TRM (Through-Reflect-Match) e LRL (Line-Reflect-Line) [6]. Após o procedimento de calibração, inicialmente é medido o padrão de reflexão, onde utiliza-se uma placa metálica (com as mesmas dimensões do MARE), em seguida o material absorvedor é sobreposto à placa de referência, e as medidas são repetidas, obtendo os parâmetros de refletividade da amostra.

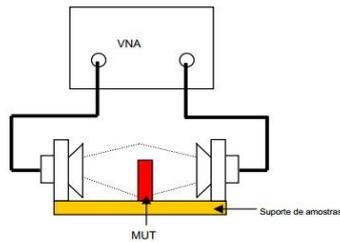


Figura 4 – Método de caracterização eletromagnética de espaço livre. [6].

- *Arco NRL*

A técnica do arco NRL é um método empregado para fornecer os coeficientes de reflexão da amostra, em diferentes ângulos de incidência [1], [2] e [7].

O diferencial desta técnica, é o uso de uma estrutura de madeira em formato de arco, onde as antenas cornetas TX e RX são situadas ao longo do arco e apontadas para um mesmo ponto, demonstrado na Figura 5.

Para a realização do ensaio, primeiramente é preciso obter os valores de referência (placa metálica), posteriormente o absorvedor é posicionado sobre a placa de referência e então são calculados os valores de atenuação (dB).

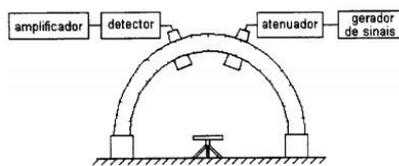


Figura 5 – Arco NRL [8].

- *Seção Reta Radar (RCS)*

Assim como no método do arco NRL, a técnica RCS caracteriza o MARE através das medidas de refletividade em variados ângulos de incidência.

A eficiência de um absorvedor pode ser caracterizada por seu RCS, relacionado com o espalhamento da radiação em um determinado ponto no espaço [2] e [7]. Quanto menor for o valor de RCS da amostra, melhor será seu desempenho.

A equação para se obter a redução RCS de um alvo (no caso, o absorvedor), correlaciona os valores

de energia recebida, energia transmitida, comprimento de onda, ganho da antena, RCS da amostra, e a distância entre o alvo e emissor.

No entanto, o ensaio deve ser realizado em um ambiente controlado, livre de interferências eletromagnéticas, como por exemplo, uma câmara anecoica [1]. Outra necessidade para o ensaio, é a construção de uma estrutura goniométrica, que fará a rotação da amostra em um ângulo de 360°, possibilitando as medidas de RCS ao redor do alvo.

Na Figura 6 é apresentado o esquema para a caracterização de um MARE, com a geometria de uma placa plana, onde uma face possui a placa de referência, e do outro lado, o absorvedor.

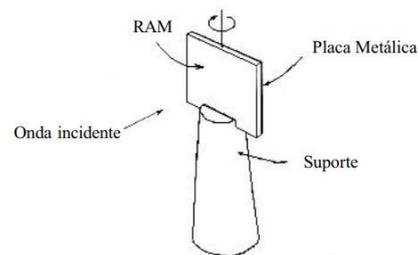


Figura 6 – Esquema para o setup RCS [7].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como observado na seção anterior, há diversos métodos para se caracterizar um MARE. Dessa forma, será apresentado na Tabela 2, um comparativo entre os métodos citados nesse trabalho. A tabela comparativa contempla informações sobre as propriedades constituintes, parâmetros S, tipos de materiais, e suas respectivas vantagens e desvantagens.

TABELA 2 – Comparação entre as técnicas de caracterização de MARE por métodos não ressonantes.

Técnicas	Parâmetros medidos	Vantagens	Desvantagens
Linha de Transmissão/Reflexão	Transmissão, Reflexão	Utilizado para medições de amostras com média e alta perda.	Requer preparação da amostra, sujeito à interferências por lacunas de ar.
Sonda Coaxial	Reflexão	Não necessita usinagem da amostra, medidas em líquidos, semi-sólidos e materiais biológicos.	Fornecer apenas medidas de reflexão, sujeito à interferências por lacunas de ar.
Espaço Livre	Transmissão, Reflexão	Não destrutivo, medições de amostra em altas temperaturas.	Requer amostra grande e plana, e calibrações especiais.
Arco NRL	Reflexão	Medições em diferentes ângulos de incidência.	Requer uma estrutura de madeira em formato de arco.
RCS	Reflexão, Redução de RCS	Análise do espalhamento da radiação.	Requer ambiente especial para ensaios e estrutura goniométrica no suporte da amostra

Os dados apresentados na tabela acima foram retirados das referências [3], [6] e [7].



4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram abordadas técnicas para caracterização de MARE, para tal, foi necessário realizar um levantamento da literatura com assuntos correlacionados. Portanto, foi possível concluir que atualmente há variados meios para medições de absorvedores eletromagnéticos, além disso, para o sucesso nos ensaios deve-se levar em consideração as frequências de atuação, características da amostra, propriedades de interesse e disponibilidade de recursos.

REFERÊNCIAS

- [1] J. C. DIAS et al, “Absorvedores de Radiação Eletromagnética Aplicados no Setor Aeronáutico”, Revista de Ciência e Tecnologia vol. 15, pag. 33-42, Junho 2000.
- [2] M. A. S. MIACCI et al, “Comparação das Técnicas de Medidas de Refletividade – RCS e Arco NRL – na Avaliação de Absorvedores de Microondas”, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal-RN, Brasil, Novembro de 2002.
- [3] J. G. GOMES, “Módulos Absorvedores de Baixo Custo para Aplicações em Ambientes de Laboratórios de Micro-Ondas”, Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica – Instituto Federal da Paraíba, 2017.
- [4] V. A. DA SILVA et al, “Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de micro-ondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons CoTi e dopada com La”, Journal of aerospace Technology and Management, vol. 1, n. 2, Julho de 2009.
- [5] P. A. G. DIAS, “Caracterização de Propriedades Eletromagnéticas de Substratos Dielétricos e Magnéticos em Alta Frequência”, Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2014.
- [6] Rohde & Schwarz, “Measurement of Dielectric Material Properties”, Nota de Aplicação.
- [7] E. L. NOHARA, “Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos”, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, Brasil, 2003.
- [8] M. C. REZENDE et al, “Efeito da Polarização de Antenas nas Medidas de Refletividade de Microondas pelo Método do Arco NRL”, Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 14, n. 3, setembro, 1999.