

Medidas de Refletividade de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética Usando as Técnicas RCS e NRL

Mirabel Cerqueira Rezende

*Divisão de Materiais/Instituto de Aeronáutica e Espaço/Centro Técnico Aeroespacial
Pça. Mal-do-Ar Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias
12228-904, São José dos Campos, SP, mirabel@iae.cta.br*

Evandro Luís Nohara, Inácio Malmonge Martin

*Universidade de Taubaté / Departamento de Engenharia Mecânica, Taubaté, SP
UNITAU, Rua Daniel Danelle S/N, 12060-440, Taubaté, SP*

Marcelo Alexandre Souza Miacci

*Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Engenharia Aeronáutica e Mecânica
12228-900, São José dos Campos, SP*

Recebido em 26 de março, 2003. Versão revisada em 25 de julho, 2003

O principal objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de refletividade de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE), utilizando duas técnicas distintas de caracterização, nomeadas Seção Reta Radar (*Radar Cross Section - RCS*) e arco NRL. As formulações dos MARE foram baseadas em mantas de borracha e tintas incorporadas com ferrita de NiZn e negro de fumo condutivo. A caracterização do MARE foi feita utilizando dois tipos de suportes (alvos), uma placa plana e um cilindro, ambos de alumínio. As medidas de referência (100 % de reflexão), foram obtidas utilizando alvos não recobertos com MARE. Após o recobrimento dos alvos com o MARE estudado, os dados de refletividade foram coletados utilizando as técnicas de RCS e arco NRL. Os dados obtidos com o alvo de placa plana mostram boa concordância entre as técnicas de arco NRL e RCS. Em relação ao cilindro, bons resultados de refletividade foram obtidos utilizando somente a técnica de RCS. Os desvios observados nas medidas foram atribuídos a pobre adesão do MARE no suporte, alterando a refletividade do material. Os resultados de RCS mostraram uma redução da refletividade de 55-98% e de 40-95%, com mantas de borracha e tintas, respectivamente, com incidência normal do sinal nas placas planas magnéticas.

Palavras chave: Seção Reta Radar, arco NRL, material absorvedor de radiação eletromagnética, MARE, absorvedor magnético.

The main objective of this work is to present results of reflectivity from Radar Absorbing Materials (RAM) using two distinct techniques of characterization, named Radar Cross Section (RCS) and NRL arch (Naval Research Laboratory). The RAM formulations were based on rubber sheets and paints filled with a NiZn ferrite and a conducting carbon black. The RAM characterization was carried out using two types of supports (targets), a flat plate panel and a cylinder, both made in aluminum. The reference measurements (100% of reflection) were obtained using the targets without RAM. After recovering the targets with the studied RAM, the reflectivity data were collected by using the RCS and NRL arch techniques. The data obtained with the flat plate target show good agreement between the NRL arch and RCS techniques. Concerning the cylinder target, good reflectivity results were obtained by using only the RCS technique. The observed deviation in the measurements was attributed to the poor adhesion of RAM to the support, altering the reflectivity of the material. The RCS results showed a reflectivity reduction of 55-98% and of 40-95%, with rubber sheets and paints, respectively, when the magnetic panels were impinged at normal incidence.

Keywords: Radar cross section, NRL arch, radar absorbing material, RAM, magnetic absorber.

1 Introdução

Os Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE), na faixa de microondas, são classificados em duas classes principais, os absorvedores dielétricos e os magnéticos. Os absorvedores dielétricos promovem a perda ôhmica da energia da onda eletromagnética incidente no material e podem ser obtidos por meio da adição de cargas como partículas de carbono (grafite, negro de fumo, carbono vítreo) [1], fibras de carbono [2], polímeros condutores [3] e partículas de metal, em determinadas matrizes de origem orgânica (parafina, resinas epóxi, fenólica, poliuretano, entre outras) e inorgânicas (por exemplo, matrizes de silicone). Entre as propriedades dielétricas desses materiais, a permissividade elétrica (ϵ) e a tangente de perda ($\tan \delta$) devem ser consideradas. Os absorvedores magnéticos dependem da permeabilidade magnética (μ) e da histerese do material, cujos diferentes valores são obtidos quando partículas de materiais magnéticos, ferritas de diferentes formulações e granulometrias, são adicionadas nas matrizes já citadas [4]. Esses materiais podem apresentar-se como mantas, filmes, espumas e corpos híbridos. Dentre as técnicas de caracterização dos MARE as mais comumente utilizadas são as denominadas de arco NRL (*Naval Research Laboratory*) e RCS (Seção Reta Radar). Nos últimos cinco anos, trabalhos de pesquisa e desenvolvimento nas áreas de processamento e caracterização de MARE, dielétricos e magnéticos, vêm sendo realizados na Divisão de Materiais do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) [5-10].

A medida de seção reta radar permite caracterizar um alvo quanto à sua refletividade, através do sinal refletido e medido no receptor do radar, girando a amostra em até 360° . O RADAR (*Radio Detection and Ranging*) foi desenvolvido em torno de 1950 visando, principalmente, atender necessidades militares. O radar é um sistema de sensoramento remoto ativo, pois possui a sua própria fonte de energia ativa para gerar imagens. Este sistema não necessita da luz solar, como nos sistemas ópticos, dando autonomia para a aquisição de dados durante o dia e a noite. Ainda, devido à específica faixa de comprimentos de onda do radar (microondas), coberturas de nuvens ou mesmo névoas, podem ser atravessadas pela radiação sem prejudicar a aquisição de imagens. O radar é baseado na transmissão e recepção de pulsos com um feixe estreito de frequências. No presente trabalho, o comprimento de onda utilizado é da ordem de centímetros do espectro eletromagnético. Os sinais de retorno (eco radar) são gravados, levando-se em consideração sua intensidade, intervalos de tempo de amostragem e fase das ondas. A potência recebida pela antena, através dos pulsos transmitidos pelo radar, está diretamente ligada às características físico-químicas e geometrias dos alvos, através do coeficiente de retro-espalhamento. O valor desse espalhamento corresponde, comparativamente, aos valores da escala Grey [11], nas imagens ópticas e é, basicamente, dependente de três importantes fatores:

- a rugosidade do alvo;
- a composição do material do alvo (propriedades elétricas

e magnéticas);

- o comprimento de onda de operação do radar.

A técnica de RCS simula um radar iluminando um alvo, por exemplo, uma aeronave, tratando-se de uma técnica muito útil na área de medidas de refletividade, pelo fato de permitir correlacionar as medidas de refletividade com as características físico-químicas dos materiais, a geometria do alvo e as características das ondas transmitidas e recebidas pelo radar, podendo essas medidas, quando tratadas adequadamente, serem extrapoladas para comportamentos reais que ocorrem em campo. Uma das metodologias de caracterização de MARE via técnica RCS utiliza um painel metálico dupla face, onde um lado é liso (referência) e o outro é recoberto ou pintado com o MARE. O painel é fixado em um suporte giratório, que é posicionado frontalmente a uma antena transmissora/receptora. A vantagem dessa metodologia é que esta permite a avaliação do eco de referência e da face revestida com o MARE, pela rotação do painel de 0 a 360° , mostrando as curvas de refletividade características dos dois lados do painel, uma após a outra [12]. Logo, é uma medida auto-calibrada, desde que a perpendicularidade do arranjo antena/painel seja mantida. A seção reta radar (σ) de alvos simples, como placas planas, diedros, triedros, esferas e cilindros, pode ser medida, expressa em metros quadrados (m^2) e comparada com valores previstos teoricamente [13].

Ao contrário da técnica RCS, a técnica NRL consiste de uma medida estática, onde o painel que está sendo caracterizado permanece fixo em uma posição, enquanto as ondas incidem na superfície de referência, sendo em seguida refletidas e medidas na antena receptora. Finalizada a caracterização do painel refletor (referência), esse é substituído pelo painel revestido com o MARE, posicionando-o exatamente no mesmo local do painel de referência. Em seguida, este painel é iluminado pela radiação emitida pela antena transmissora e o sinal refletido é medido. O posicionamento do painel é feito em um suporte situado a uma distância pré-fixada, atendendo à condição de campo distante [14], das antenas de transmissão e recepção, como mostra o esquema da Figura 1. O ângulo do sinal emitido pode ser regulado sobre o suporte das antenas, que consiste de um arco de madeira, que não deve interagir com a faixa de radiação em estudo. A frequência de transmissão é escolhida e fixada e os dados da refletividade podem ser adquiridos via computador PC e uma placa HPIB. O diagrama dos sinais refletidos pela placa lisa metálica (referência) e pelo painel revestido com o MARE (mantas ou tintas) é obtido, e por simples diferença, ponto a ponto, entre os dois diagramas, determina-se os valores de refletividade do material. Para maiores detalhes sobre como utilizar o arco NRL, para a realização de medidas da refletividade de materiais absorvedores ou espalhadores de radiação eletromagnética, na faixa de 2-18 GHz, sugere-se a leitura das referências [15,16].

Apesar das técnicas abordadas permitirem a avaliação da atenuação média da radiação incidente no alvo, essas são limitadas quando alvos de geometrias complexas são

caracterizados. Porém, sabendo-se que um alvo complexo é formado pela combinação de alvos de geometria mais simples, em disposições diversas, trabalhos envolvendo a caracterização de alvos com geometrias simples, e as suas combinações, podem ser realizados com o objetivo de elucidar o diagrama de RCS do alvo de geometria complexa. Este trabalho aborda a realização de medidas pelo uso das

duas técnicas apresentadas, de alvos de geometrias simples, metálicos (placa plana e cilindro), sem e com recobrimento com MARE. Como materiais absorvedores de radiação, este estudo utilizou MARE processados como mantas finas de silicone ($1,5 \pm 0,5$) mm e dois tipos de tintas poliuretânicas, ambas aditadas com ferrita de NiZn e partículas de negro de fumo condutor.

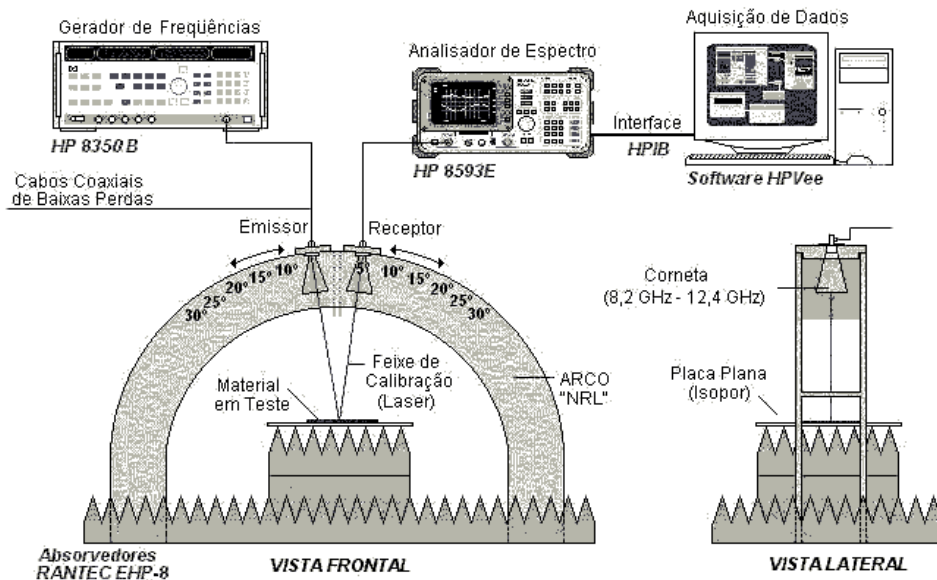


Figura 1. Esquema do arco NRL instrumentado utilizado em medidas no CTA.

2 Materiais e métodos

Para a realização das medidas de refletividade pelo uso das técnicas RCS e NRL de alvos, com e sem materiais absorvedores, e com o objetivo de pesquisar o comportamento da interação onda-matéria dos MARE processados como tintas e mantas poliméricas, foram montados dois conjuntos experimentais, como mostra a Figura 2, um constituído de uma câmara anecóica e o outro de um arco NRL, ambos ins-

trumentados para operar na faixa de freqüências de 8 a 12 GHz. A calibração do sistema de medidas pela técnica RCS foi realizada pelo uso de lentes de Luneberg e alvos de diferentes geometrias. Para a calibração do arco NRL foram obtidos inúmeros dados de refletividade de uma placa plana de alumínio, comparando-se esses dados com simulações via CAD eletromagnético [17,18], até que o desvio entre as medidas fosse inferior a 1%.



Figura 2. Vista geral do Laboratório de Caracterização Eletromagnética da Divisão de Materiais/IAE/CTA com duas câmaras anecóicas ao fundo e o arco NRL à esquerda.

Maiores detalhes sobre a técnica do arco NRL são apresentados nas referências [9,15]. E, sobre a técnica de RCS nas literaturas [12,18].

Como materiais absorvedores de radiação, este trabalho utilizou MARE processados como mantas finas de silicone ($1,5 \pm 0,5$) mm e dois tipos de tintas poliuretânicas (bi-componente, disponível comercialmente), processadas pela

adição de partículas de uma ferrita de NiZn e de negro de fumo condutor, atendendo as formulações apresentadas na Tabela 1. As formulações foram aplicadas em placas planas de 30 cm x 30 cm e em cilindros de 32 cm de comprimento por 15 cm de diâmetro, todos em alumínio 2024. As formulações utilizadas foram previamente estudadas em trabalhos anteriores [8,9].

Tabela 1. Características dos MARE utilizados neste trabalho [8,9].

Código	Matriz	Negro de Fumo % (m/m)	Ferrita NiZn % (m/m)	Espessura Média Após Aplicação (mm)
Tinta 1	Poliuretano	0	5,0	1,5
Tinta 2	Poliuretano	0,5	5,0	1,5
Manta 1	Silicone	0,5	5,0	1,5
Manta 2	Silicone	0,5	5,0	2,0
Manta 3	Silicone	0	5,0	2,0

Os MARE denominados de tintas 1 e 2 e mantas 2 e 3 foram aplicados diretamente nos suportes tipo placa plana e a manta 1 no cilindro metálico. Após aplicar a mistura homogênea da tinta via técnica convencional de pintura por rolo, os MARE foram polimerizados à temperatura ambiente por 48 h, seguidos de uma pós-cura em estufa a 60°C por 2 h. Com relação às mantas de silicone, estas foram preparadas e polimerizadas à temperatura ambiente por 48 h, sobre um filme plástico desmoldante. Após a cura completa do silicone, estas mantas foram caracterizadas pelo seu posicionamento sobre as placas planas e o cilindro, via colagem.

Em seguida, os suportes revestidos com as tintas e as mantas foram caracterizados via medidas de refletividade utilizando-se as técnicas do arco NRL e de seção reta radar, na faixa de frequências de 8-12 GHz.

3 Resultados e discussão

- Avaliação das placas planas

Tendo como referência uma placa plana de alumínio 2024, lisa, refletindo 100% da radiação incidente, isto é, 0 dB de atenuação (Figuras 3a e 3b), foram obtidas as curvas de refletividade com os revestimentos denominados tinta 1 e tinta 2, respectivamente. A análise das curvas mostra que ambas as tintas são mais eficientes na atenuação da radiação a partir de 10 GHz (valores de atenuação em torno de -10 dB de refletividade). Em 8 GHz, a atenuação da tinta 1 diminuiu para cerca de -3 dB de refletividade, enquanto que a tinta 2 reflete um pouco menos, da ordem de -6 dB. Em sendo assim, verifica-se que ambas as tintas aumentam a atenuação da radiação com o aumento da frequência até 10 GHz, sendo

observado que a partir desse valor de frequência até 12 GHz a refletividade se mantém praticamente constante (em torno de -11 dB).

A Figura 4 mostra a curva de refletividade típica da placa revestida com a manta 2 e 3, ambas em função da frequência.

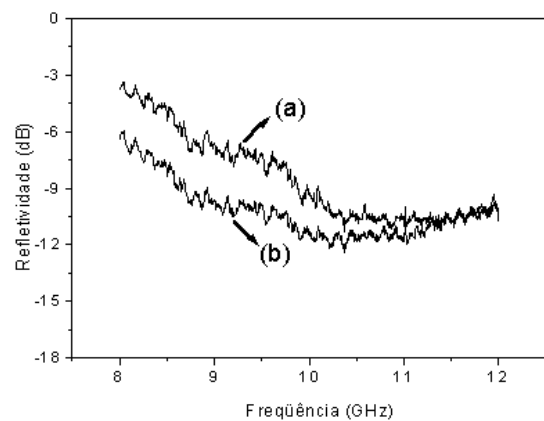


Figura 3. Curvas de refletividade obtidas via arco NRL das placas planas revestidas com a tinta 1 (a) e com a tinta 2 (b).

A manta 2 (Figura 4) apresenta valores de atenuação de até -16 dB em torno de 8,3 GHz, com comportamento ressonante, diminuindo a eficiência na atenuação da radiação em função do aumento da frequência. No caso da manta 3, o maior valor de atenuação pelo MARE se deu em 8 GHz, da ordem de -8 dB, aumentando a refletividade em função do aumento da frequência. Como já observado nas formulações das tintas, neste tipo de absorvedor a adição de negro de fumo também melhorou a eficiência do MARE processado.

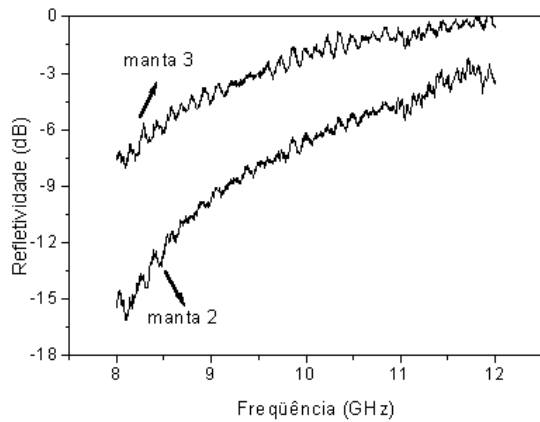


Figura 4. Curva da refletividade da placa metálica revestida com a manta 2 e 3.

A Figura 5 mostra a curva RCS em função da frequência obtida para a placa plana recoberta com a manta 2. A análise desta figura mostra que a redução do RCS medido é significativa para mais baixas frequências, diminuindo em função do aumento da frequência. Este resultado é concordante com a técnica NRL. Na Figura 5 também são apresentadas as medidas de RCS obtidas com a placa revestida com a manta 3, podendo-se observar que a redução de RCS por este MARE é inferior à obtida com a manta 2, fato este também verificado nas medidas usando a técnica NRL.

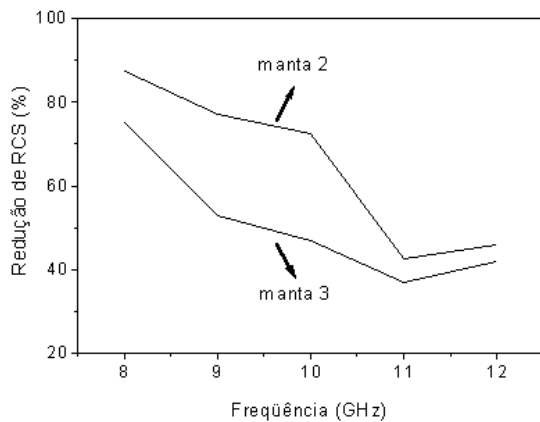


Figura 5. Medidas de redução do RCS em função da frequência da placa revestida com a manta 2 e 3.

A Figura 6 compara os resultados de atenuação da radiação obtidos com as duas técnicas de medidas (RCS e NRL), para as mantas 2 e 3. No caso das placas revestidas com as tintas 1 e 2, as comparações entre as duas técnicas podem ser observadas na Figura 7.

A análise da Figura 6 mostra que existe uma maior concordância entre as duas técnicas em frequências acima de 10 GHz. No entanto, é observado um desvio entre 8 e 10 GHz que foi atribuído à inadequada fixação da manta à placa

metálica, visto que a manta tem como base uma matriz de silicone, que por sua vez não exibe boas propriedades de adesão em metais após a sua completa polimerização. Este fato favoreceu o aparecimento de vazios (bolhas de ar) entre a manta e a placa, inserindo novos valores de impedância na interface entre a placa metálica e o MARE utilizado [7], sendo que este novo valor de impedância pode melhorar ou não a atenuação da radiação em função da posição da placa. No caso das medidas no arco NRL, a placa revestida é posicionada na horizontal, diminuindo a formação dos vazios. Já no caso das medidas de RCS, a placa é posicionada na vertical, e nesta posição a formação de bolhas pelo deslocamento do MARE é muito maior, explicando os desvios observados nas medidas.

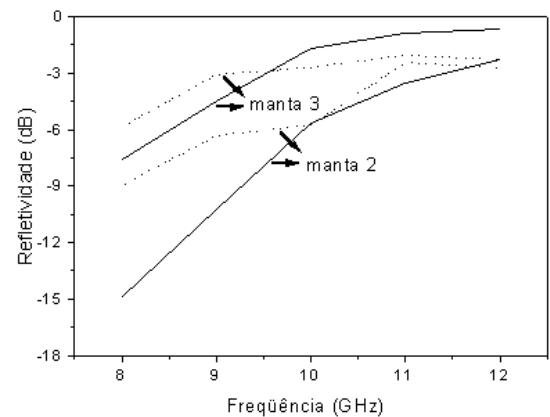


Figura 6. Comparação das medidas entre as técnicas RCS (linha tracejada) e NRL (linha cheia) com a placa revestida com a manta 2 e 3.

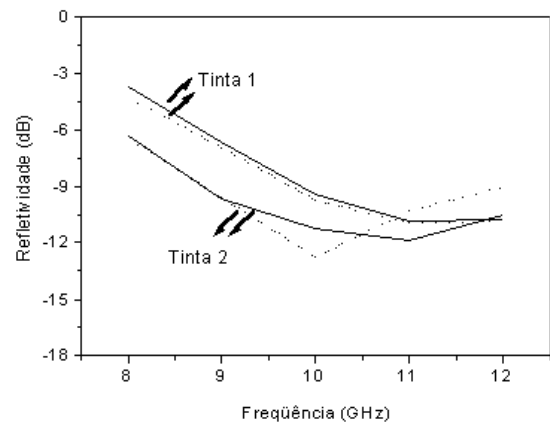


Figura 7. Medidas comparativas entre as técnicas RCS (linha tracejada) e NRL (linha cheia) para a placa revestida com a tinta 1 e 2.

Com relação à Figura 7, a tinta 1 apresenta um bom ajuste entre as curvas obtidas pelas técnicas do arco NRL e RCS, praticamente em todo intervalo de frequências. No

entanto, a tinta 2 da Figura 7 mostra que as medidas apresentam um desvio, entre as frequências de 9 e 12 GHz, que foi atribuído a um pequeno empenamento da placa após a cura da tinta em estufa. Este empenamento não é corrigido nas medidas no arco NRL, pois a placa revestida com o MARE é simplesmente posicionada sobre um suporte de isopor, sem exigir uma fixação mais rígida da mesma. O contrário ocorre nas medidas de RCS onde a placa é forçada à sua posição original pelo rígido suporte de fixação.

Comparando-se os valores de redução de RCS observa-se uma redução de refletividade de 55-98% e de 40-95%, quando as placas revestidas com as mantas e as tintas foram iluminadas em incidência normal, respectivamente.

- Avaliação do cilindro

Para a determinação das curvas de refletividade via técnica RCS do cilindro, este foi posicionado em um suporte vertical rígido com facilidade de giro de 360° em torno de seu eixo, na faixa de frequências de 8 a 12 GHz. As Figuras 8 e 9 são representativas de medidas de refletividade em função do ângulo de aspecto (cilindro recoberto com a manta 1, girando) em 9 e 10, e 11 e 12 GHz, respectivamente, tendo como referência o cilindro sem aplicação de MARE, refletindo 100% da radiação incidente, isto é, 0 dB de atenuação.

No caso do cilindro destaca-se que a técnica de RCS é muito mais fácil e útil para a caracterização do MARE, devido à simetria em torno do eixo vertical do cilindro. Em paralelo, medidas de refletividade estáticas também foram obtidas utilizando-se o mesmo dispositivo de fixação usado na técnica RCS. Porém, neste caso particular, o cilindro permaneceu fixo (sem girar), sendo iluminado pela onda eletromagnética em um ângulo de aspecto de $\pm 5^\circ$. A Figura 10 ilustra os dados obtidos.

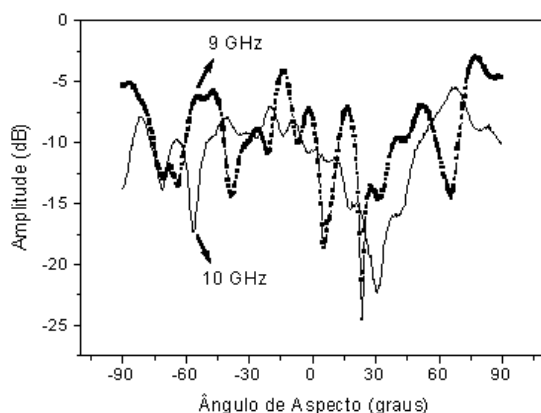


Figura 8. Refletividade do cilindro recoberto com MARE, em 9 e 10 GHz, via técnica RCS.

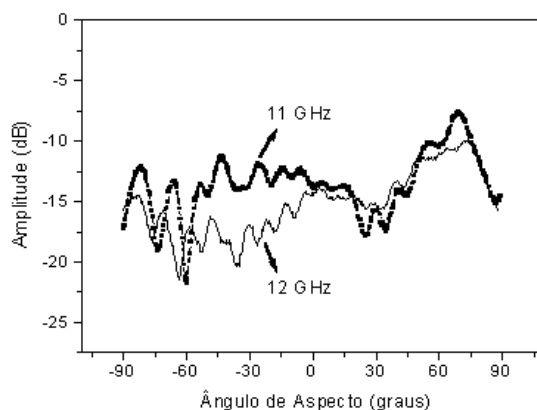


Figura 9. Refletividade do cilindro recoberto com MARE, em 11 e 12 GHz, via técnica RCS.

A análise das figuras apresentadas mostra que a refletividade da manta 1, obtida por meio de medidas de RCS, apresenta um decréscimo com o aumento de frequência. Esta característica é mais facilmente visualizada analisando-se as medidas de refletividade obtidas com o cilindro sem girar, simulando a técnica do arco NRL (Figura 16).

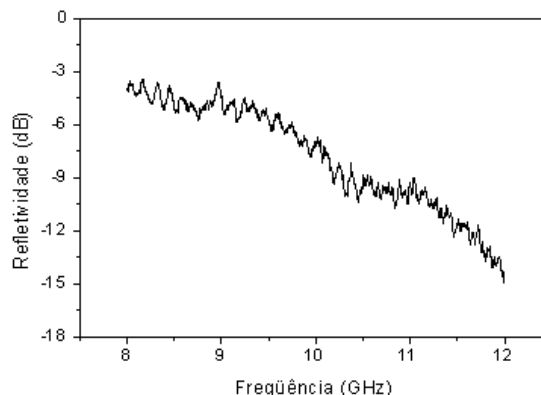


Figura 10. Medidas de refletividade do cilindro revestido com a manta 1, sem girar, via técnica RCS.

A análise da Figura 8 em 10 GHz mostra, também, entre os ângulos de 65° e 75° , um aumento de refletividade, denominado de 'ponto brilhante' [14], ou seja, existe a presença de um pico de refletividade, situado neste intervalo de ângulos de aspecto. Este se deve à não homogeneidade do material. Esses pontos brilhantes variam em função da frequência de operação.

4 Conclusões

Este trabalho mostra resultados da caracterização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de microondas, usando as técnicas conhecidas como arco NRL

e seção reta radar (RCS). Esta última consiste de um sistema simples, que utiliza um suporte giratório no eixo vertical, onde alvos são posicionados com e sem materiais absorvedores de radiação, para a determinação das curvas de refletividade. No caso da técnica de RCS, os dispositivos são posicionados no interior de uma câmara anecóica, de maneira a eliminar os efeitos de ondas espúrias, minimizando, assim, interferências nas medidas. Comparando-se os resultados obtidos pelas técnicas RCS e arco NRL, pode-se, de maneira simples, avaliar a característica de atenuação da radiação pelo material absorvedor, quando aplicado em alvos, como placa plana e cilindro. Valores de refletividade concordantes foram obtidos pelas duas técnicas utilizadas, para os três tipos de mantas e as duas tintas caracterizadas. Essas duas técnicas de medidas fornecem subsídios suficientes para caracterizar materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8-12 GHz, sempre tomando-se o cuidado de eliminar a interferência por radiações espúrias, via medição no interior de uma câmara anecóica (técnica de RCS) ou, no caso do arco NRL, isolando a área de medidas por absorvedores piramidais altamente eficientes na atenuação da radiação (-50 dB). Estas duas técnicas de caracterização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de microondas estão implementados no Laboratório de Caracterização Eletromagnética da Divisão de Materiais/IAE/CTA, apoiando vários projetos na área de processamento e caracterização de MARE.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Comando da Aeronáutica e ao CTA em São José dos Campos/SP, à FAPESP (Proc. 98/15839-4), ao CNPq (Proc.303511/2003-6, 300599/96) e a CAPES.

References

- [1] Lee, S. M. *International Encyclopedia of Composites*. vol. 6, VHC Publishers, New York, USA, 1991.
- [2] Johnson, R.N. Radar Absorbing Material: A Passive Role in an Active Scenario. *International Countermeasures Handbook*, 11th ed., E.W. Communications, Palo Alto, CA., USA, 1992.
- [3] Faez, R.; Martin, I. M.; Paoli, M. A.; Rezende, M. C., Microwave Properties of EPDM/Pani-DBSA Blends. *Synthetic Metals*. **119**, 435 (2001).
- [4] Kim, S.S.; Cheong, M.G.; Yoon, B.I. Ferrite-Epoxy Absorber on Carbon Fiber Composite Substrate. *Journal de Physique III*. França, Março (1997).
- [5] Nohara, E. L. *et al.* Medidas de Refletividade, Transparência e Seção Reta Radar (RCS) de Compósitos Avançados na Faixa de 8 – 12 GHz. X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, 12-16 agosto, Recife, Brasil, 2002.
- [6] Miacci, M.S. *et al.* Radar Cross Section Measurements (8-12GHz) of Flat Plates Painted with Microwave Absorbing Materials. SBMO/IEEE, Belém, PA, 1, 263, 2001.
- [7] Franchitto, M. Caracterização Eletromagnética de Materiais Absorvedores de Microondas. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2001. Tese de Mestrado.
- [8] Dias, J.C. Obtenção e caracterização de revestimentos absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 2 a 18 GHz. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2000. Tese de Doutorado.
- [9] Silva, F. S. Obtenção de estruturas híbridas absorvedoras de radiação eletromagnética na faixa de 8-16 GHz, aplicadas no setor aeronáutico. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2000. Tese de Mestrado.
- [10] Rezende, M.C., Nohara, E.L., Martin, I.M.. Pedido de patente: "Processo para obtenção de revestimentos absorvedores de microondas (2-20 GHz) à base de poliuretanos e resinas epóxi aditados com partículas de carbono e ferritas". IAE/AMR/CTA, INPI - PI9805581-0, 1998.
- [11] Wilson, D. L., Baddeley, A.J., Owens, A R. A new metric for Grey-scale image comparison. *International Journal of Computer Vision*. **24**, 5-17 (1997).
- [12] Miacci, M. A S. *Determinação experimental do espalhamento monoestático de microondas por alvos de geometrias simples*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2002. Tese de Mestrado.
- [13] Bhattacharyya, A. K., Sengupta, D. L. Radar Cross Section Analysis and Control. Artech House, Norwood, 1991.
- [14] Currie, N. C. Radar Reflectivity Measurement: Techniques and Applications. Artech House, Norwood, 1 ed., 1989.
- [15] Rezende, M.C. *et al.* Efeito da Polarização de Antenas nas Medidas de Refletividade de Microondas pelo Método do Arco NRL. *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*. **14**, nº 3, 79-85 (1999).
- [16] Emerson & Cuming. Technical notes, 2003. Disponível em <http://www.eccosorb.com/tech_notes.asp> Acesso em: 20 jul. 2003.
- [17] Nohara, E.L. *et al.* Medidas da Seção Reta Radar (RCS) em 8-12 GHz, de um cilindro revestido com material absorvedor de radiação, X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, vol. 1, 569-578, Recife, Agosto, (2002).
- [18] Nohara, E.L. *et al.* Comparação das Técnicas de Medidas de Refletividade – RCS e arco NRL - na Avaliação de Absorvedores de microondas. Congresso Brasileiro da Ciências do Materiais – CBECIMAT – 9 a 13 novembro de 2002, Natal, Brasil, (2002).