

INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE FILMES FINOS DE ALUMÍNIO NA ATENUAÇÃO DA ENERGIA DA ONDA ELETROMAGNÉTICA NA FAIXA DE MICROONDAS (8 – 12GHZ)

V.L.Soethe^{1*}; E.L. Nohara²; L.C.Fontana³; M.C.Rezende⁴

¹ ITA, 12.228-900, São José dos Campos, SP

² UNITAU, Departamento de Engenharia Mecânica, 1.2060-040, Taubaté, SP

³ UDESC, Departamento de Física, 89.223-100, Joinville, SC

⁴ CTA, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais, 12.228-900, São José dos Campos, SP

Recebido: 15 de março, 2008; Revisado: 24 de junho, 2008

Palavras-chave: Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE), Filmes Finos, Magnetron Sputtering.

RESUMO

Filmes finos de alumínio foram depositados sobre substratos de poli(terefalato de etileno)(PET) por meio de um sistema do tipo Triodo Magnetron Sputtering (TMS). Foi observado que o conjunto filme/substrato é capaz de atenuar a energia da onda eletromagnética incidente na faixa de frequências de 8 – 12 GHz. Os resultados obtidos mostram que filmes finos apresentam-se eficientes como materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE). Resultados de refletividade em equipamento de guia de onda mostram que a atenuação da energia apresentada pelos filmes finos depende da espessura dos mesmos. Filmes com espessuras da ordem de 65 a 200nm apresentam atenuação da energia da onda eletromagnética de 60 a 90% em diferentes frequências. Análises por microscopia de força atômica (AFM) e espectrometria por espalhamento de Rutherford (RBS) foram realizadas com o intuito de avaliar propriedades como espessura, composição química e morfologia dos recobrimentos.

ABSTRACT

Aluminum thin films were deposited on polyethylene terephthalate (PET) substrate, using a Triodo Magnetron Sputtering (TMS) equipment. It was observed that the set thin film plus the substrate is able to attenuate the energy of the incident electromagnetic wave in the frequency range of 8 to 12 GHz. The obtained results enable the obtained films to be used as Radar Absorbing Material (RAM). Reflectivity results obtained in waveguide show that the attenuation depends on the thin film thickness. Films with thickness from 65 to 200 nm present attenuation of electromagnetic wave energy from nearly 60 to 90%. Analysis by atomic force microscopy and Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS) provided further information on the characterization of the studied films, namely the thickness, the chemical composition and morphology aspects.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso de radiação eletromagnética na faixa de frequência de microondas têm se tornado intenso especialmente na área de telecomunicações, como por exemplo em telefonia celular, transmissão e recepção em antenas, bem como em sistemas utilizados na indústria aeronáutica. A pesquisa para o desenvolvimento de eficientes materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) têm sido ampliada com o intuito de reduzir os danos causados pela incidência desta radiação em seres vivos. Os MARE apresentam ainda aplicações civis e militares, dentre as quais podemos citar: blindagem eletromagnética de equipamentos utilizados nas indústrias automotivas, aeroespacial, militar e de equipamentos eletro-eletrônicos, além de sistemas de comunicação wireless [1-8].

Basicamente, um MARE transforma a energia da onda eletromagnética em calor. São classificados em dois grupos principais: MARE's baseados em centros absorvedores de perdas dielétricas e magnéticas. Esta classificação depende do tipo de interação da onda eletromagnética incidente com o material. Os MARE baseados em centros absorvedores de perdas dielétricas são caracterizados pela interação do campo elétrico da onda eletromagnética com os elétrons presentes no material. Por outro lado, os MARE baseados em centros absorvedores de perdas magnéticas são caracterizados pela interação do campo magnético da onda eletromagnética incidente com o material do filme. Os MARE tradicionais frequentemente apresentam espessuras da ordem de centímetros e gramatura da ordem de 1 a 20 kg/m² [1-3, 9, 10]. Filmes finos representam uma nova tendência para a produção de materiais absorvedores de radiação eletromagnética. A principal vantagem deste tipo de material em relação aos MARE convencionais reside no fato de apresentarem baixo peso e pequena espessura. MARE's baseados em filmes finos, apresentam perdas do tipo dielétrica. Basicamente, quando o campo elétrico da onda eletromagnética incidente interage com o material do filme, ocorre a formação de dipolos elétricos, os quais são alinhados de acordo com a orientação deste campo. A orientação dos dipolos favorece o surgimento de uma corrente elétrica no material. A passagem desta corrente na superfície do filme fino promove a

* vivianes@ita.br

transformação da energia elétrica em calor por meio de efeito Joule [11-12].

De modo geral, metais são excelentes refletores de radiação na faixa de frequências de microondas. Entretanto, alguns metais e metais de transição com espessuras da ordem de nanômetros, são capazes de atenuar a radiação eletromagnética incidente. Por exemplo, filmes de Kantal, com espessuras da ordem de 10 a 200nm, quando utilizados como recobrimento de paredes internas de guias de onda, apresentam-se eficientes como MARE. Estes filmes, na faixa de frequências de 16.3 a 17.5GHz, apresentam valores de atenuação em torno de 0,8dB (~17% de absorção), dependendo do valor da espessura [13].

Para que os filmes metálicos possam ser utilizados como MARE, a espessura do recobrimento deve ser próxima a camada pelicular, conhecida com *skin depth* (δ). Nesta condição, a corrente elétrica proveniente da interação da onda com o material do filme fica confinada na superfície do mesmo. O valor de δ está relacionado com a profundidade de penetração da onda eletromagnética na estrutura do filme, e é dependente do material utilizado como recobrimento, bem como do comprimento da onda incidente [14]. Por meio da equação 1 é possível calcular o valor de δ para diferentes materiais [15]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

Para o alumínio, por exemplo, sabendo que a condutividade elétrica é dada por $\sigma = 3,76 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ e que a permeabilidade magnética é $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ [15-16], temos que o valor do *skin depth* em função da frequência da radiação incidente pode ser obtido utilizando-se a equação 2.

$$\delta = \frac{0.082}{\sqrt{f}} \quad (2)$$

Considerando a importância tecnológica e acadêmica deste assunto nos dias atuais, foi realizado um estudo da influência da espessura de filmes de alumínio na atenuação da radiação de microondas na faixa de frequências de 8 a 12GHz.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Filmes finos de alumínio foram depositados sobre substratos poliméricos de poli (terefalato de etileno) (PET), por meio de um equipamento do tipo *Triodo Magnetron Sputtering* [17]. Este processo difere do *Magnetron Sputtering Convencional* devido a presença de uma tela (aterrada) paralela ao alvo, localizada a aproximadamente 2,0 cm do mesmo. A utilização desta tela favorece o confinamento do plasma próximo ao alvo, aumentando a estabilidade do mesmo e a taxa de deposição. Por meio deste sistema é possível trabalhar com pressões do gás de trabalho inferiores (2,0mTorr de argônio) às utilizadas em processos convencionais. Assim, os átomos arrancados do alvo sofrem poucas colisões com as partículas presentes no gás de trabalho, chegando ao

substrato com maior energia cinética, favorecendo o crescimento de filmes com menor quantidade de defeitos. O esquema experimental para a produção dos filmes pode ser observado na figura 1.

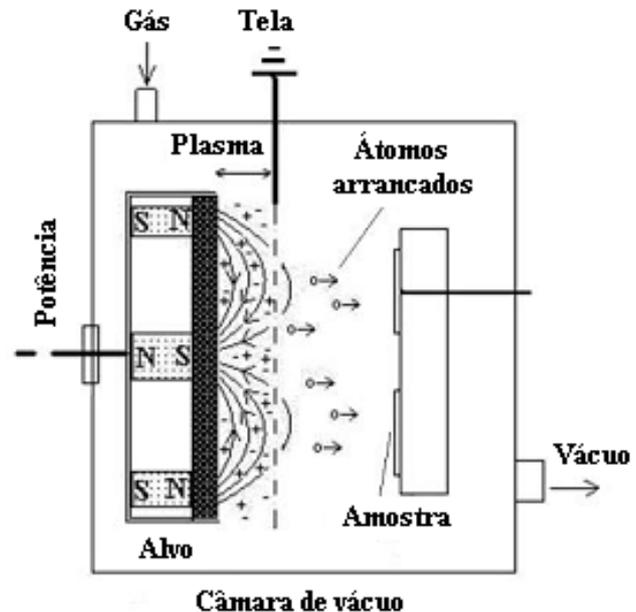


Figura 1 - Esquema experimental do equipamento utilizado para deposição dos filmes.

Os parâmetros experimentais utilizados para as deposições podem ser observados na tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros experimentais utilizados para deposição dos filmes de alumínio

Voltagem (V)	Corrente (A)	Pressão (mTorr)	Tempo de deposição (s)	Espessura (nm)
-470	0.50	2.0	60 to 160	65 - 200

A atenuação da energia da onda eletromagnética pelos recobrimentos foi medida por meio de um equipamento de refletividade em guia de ondas, utilizando um analisador vetorial de redes (Hewlett Packard 8510). Duas técnicas distintas são utilizadas para medir a atenuação do material analisado. A primeira delas consiste na obtenção da energia absorvida (E_a) por meio da diferença entre a energia incidente (E_i) e a energia transmitida (E_t). Esta condição é mostrada esquematicamente na figura 2(a). O segundo método consiste na colocação do conjunto filme/substrato sobre uma placa metálica totalmente refletora. Neste caso, é avaliada a capacidade que o conjunto possui de atenuar a energia refletida por esta placa. A energia absorvida (E_a) é obtida pela diferença entre as energias incidente (E_i) e energia refletida (E_r). A figura 2(b) representa esquematicamente este aparato. Ambos os métodos apresentados na figura 2 foram utilizados para caracterizar os filmes finos de alumínio.

A análise da topografia dos recobrimentos foi realizada por meio de equipamento de microscopia de força atômica (AFM). Com o objetivo de obter maiores informações sobre

a espessura e a composição química dos filmes, foi realizada análise utilizando equipamento de espectroscopia por espalhamento de Rutherford (RBS), com um feixe de He^+ e 2,2MeV de energia. Os resultados foram tratados e simulados utilizando programa computacional apropriado.

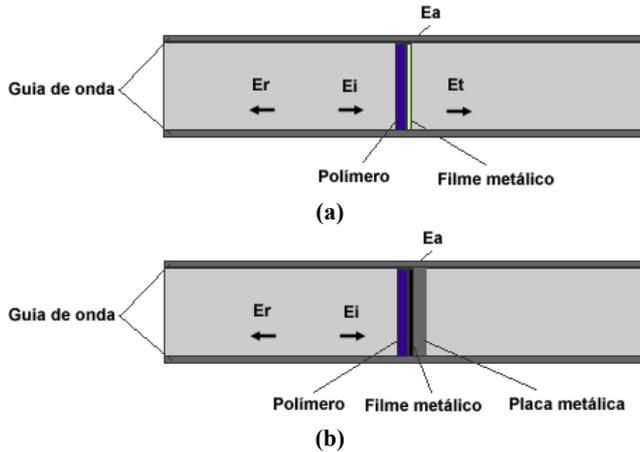


Figura 2 - Esquema do equipamento de medida de refletividade em guia de ondas (a) sem placa metálica (medida de atenuação intrínseca); (b) com placa metálica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A espessura dos recobrimentos foi medida utilizando equipamento de RBS. Neste tipo de espectro, as diferenças entre a largura à meia altura apresentada pelos picos estão diretamente relacionadas com a espessura dos recobrimentos analisados. Os valores de espessura, obtidos por meio da análise dos espectros, podem ser observados na figura 3. É possível verificar que os filmes apresentam espessuras da ordem de centenas de nanômetros, que variam de 65 a 200nm e são crescente com o tempo de deposição.

Pelas análises de AFM é possível verificar os detalhes da topografia da superfície dos recobrimentos. A figura 4 é relativa à análise, via AFM, de um filme de alumínio com espessura de 130nm. De acordo com a micrografia, é possível observar que o recobrimento apresenta baixa rugosidade, da ordem de dezenas de nanômetros. Ainda por meio desta micrografia, verifica-se que o filme recobre toda a superfície do substrato de maneira homogênea.

Neste estudo, o comprimento da onda incidente é da ordem de centímetros, ao passo que a rugosidade é da ordem de nanômetros. Desta forma, a onda eletromagnética incidente não sofre desvio, pois seu comprimento é muito superior à rugosidade apresentada pelo filme [18]. Este resultado indica que o processo de atenuação dos filmes não é influenciado pela rugosidade da superfície.

A figura 5 mostra os resultados de refletividade em equipamento de guia de ondas para filmes de alumínio com diferentes espessuras.

De acordo com a figura 5, os filmes apresentam expressivos valores de atenuação de 70 a 99,9%, na faixa de frequências de 8,0 a 9,4GHz. Estes resultados foram obtidos utilizando

um equipamento de refletividade em guia de ondas conforme ilustração da figura 2(b).

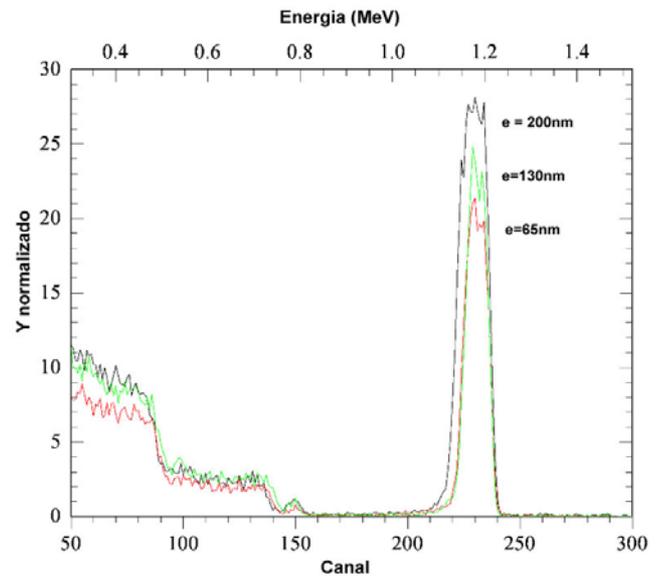


Figura 3 - Espectro de RBS para filmes de Al, com três diferentes espessuras, sobre substrato de PET.

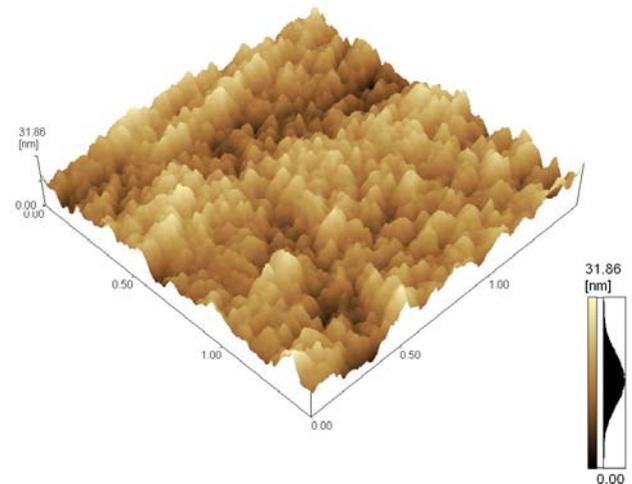


Figura 4 - Micrografia obtida por meio de equipamento de AFM para o filme de alumínio com 130nm de espessura.

É possível observar que o máximo de atenuação ocorre em diferentes frequências, dependendo do valor da espessura do recobrimento. Além disso, verifica-se que a frequência de máxima atenuação ($f_{\text{máx}}$) é distinta para as diferentes espessuras.

Os resultados apresentados na figura 5 são característicos de MARE's convencionais, com típico comportamento ressonante (frequência específica), onde o mecanismo de atenuação preponderante está relacionado com a interferência destrutiva entre as ondas incidente e refletida (cancelamento de fase) para um dado comprimento de onda. No caso de MARE convencionais, para que este fenômeno ocorra, a espessura do material absorvedor deve ser da ordem de $1/4\lambda$. Para frequências entre 8,0 e 12,0GHz, o comprimento de onda é da ordem de centímetros. Desta forma, considerando

que o substrato polimérico apresenta espessura da ordem de centenas de μm e o recobrimento metálico apresenta espessura da ordem de centenas de nanômetros, a espessura do conjunto filme/substrato é inferior $1/4\lambda$. Logo, pode-se afirmar que o fenômeno de cancelamento de fase das ondas incidente e refletida não é o principal mecanismo responsável pela atenuação da energia da onda eletromagnética apresentada pelos filmes finos de alumínio.

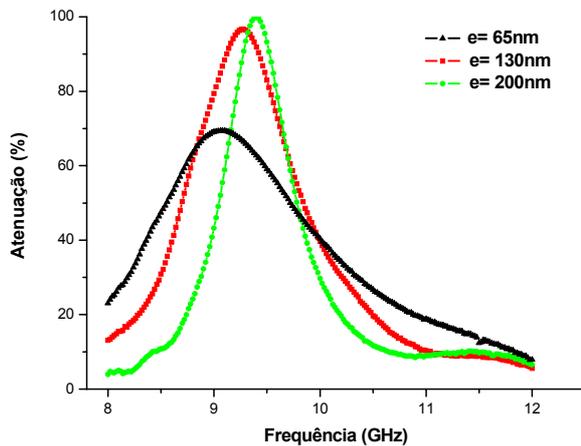


Figura 5 - Resultados de análise de refletividade em guia de ondas com placa metálica, para filmes de alumínio, sobre PET, com diferentes espessuras.

A tabela 2 relaciona os resultados obtidos pela simulação dos espectros de RBS e os respectivos tempos de deposição utilizados para obtenção de cada amostra.

Tabela 2 - Dados obtidos da análise dos espectros de RBS para os filmes finos de alumínio.

Tempo de deposição (s)	Espessura (nm)	$f_{\text{máx}}$ (GHz)	$w_{1/2h}$ (GHz)
60	65	9.16	1.78
120	130	9.28	1.13
160	200	9.41	0.68

Observando a tabela 2 é possível verificar que a frequência de máxima atenuação é deslocada para valores maiores com o aumento da espessura dos filmes. Por outro lado, o aumento da espessura produz um decréscimo na largura à meia altura ($w_{1/2h}$) do pico de atenuação. Isto evidencia que a amplitude de atenuação está relacionada com a espessura do recobrimento, sendo que filmes mais finos apresentam valores de atenuação inferiores, porém em uma maior faixa de frequências. Este resultado pode ser melhor visualizado pelo gráfico da figura 6.

O valor do *skin depth* para o alumínio puro, obtido pela equação 2, para uma frequência de 9,0GHz é de 800nm. Os filmes de alumínio analisados neste trabalho têm espessuras inferiores, entre 65 e 200nm. Uma vez que esses filmes possuem espessuras da mesma ordem de grandeza do *skin depth* para o alumínio puro, o fenômeno de atenuação da energia da onda eletromagnética pode estar associado a este efeito

de camada pelicular. Neste caso o confinamento da corrente elétrica na superfície do recobrimento, gerada a partir da polarização das cargas elétricas presentes na estrutura do filme metálico, promove a transformação da energia da onda eletromagnética incidente em calor, por efeito Joule [12]. Em resumo, é possível relacionar o fenômeno de atenuação da onda eletromagnética apresentada por esses filmes de alumínio com o efeito de *skin depth*.

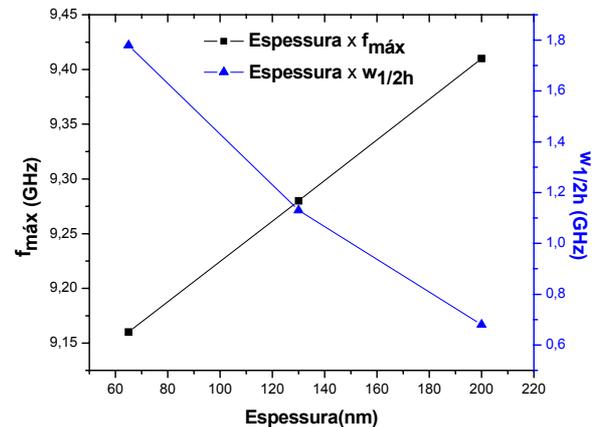


Figura 6 - Relação entre a espessura e a frequência de máxima atenuação e largura à meia altura do pico de atenuação para os filmes de Al.

A figura 7 apresenta o resultado de atenuação para o filme com 200nm de espessura. Este resultado foi obtido utilizando o aparato apresentado esquematicamente na figura 2(b). Pela figura 7 é possível observar que o filme apresenta valores de atenuação em torno de 20% em toda a faixa de frequências. Este tipo de comportamento é característico de atenuação intrínseca. O mecanismo de dissipação descrito está relacionado com o material utilizado como filme metálico e também com a espessura do mesmo que é da mesma ordem de grandeza do valor do *skin depth* do material.

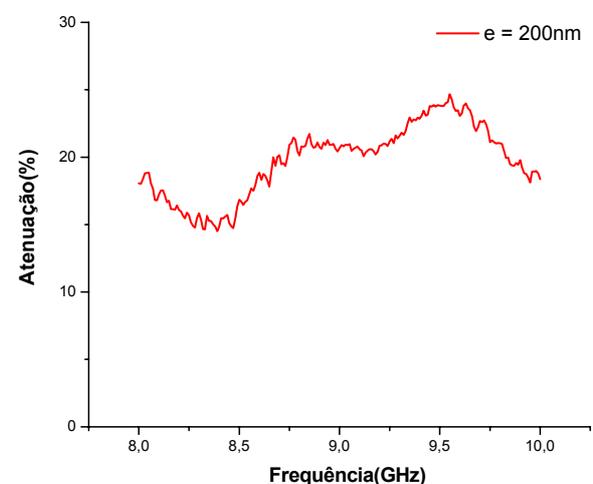


Figura 7 - Resultado de refletividade em guia de ondas sem placa metálica para filme de alumínio com 200nm de espessura.

4. CONCLUSÕES

Resultados de refletividade em guia de ondas dos recobrimentos com espessuras da ordem de 65 a 200nm, na faixa de frequências de 8 -12GHz, mostram valores de atenuação da energia da onda eletromagnética significativos. Atenuações de 70 a 99%, numa faixa de frequências entre 8 e 9,4GHz foram medidas. Foi observado que a amplitude desta atenuação e a frequência na qual ela ocorre varia de acordo com a espessura do recobrimento. Estes resultados podem ser relacionados com o efeito de *skin depth*. Filmes finos com espessuras mais próximos do valor do *skin depth* do material puro, apresentam valores de atenuação mais significativos, porém em uma menor faixa de frequências. Quando avaliados em equipamento de guia de ondas sem placa metálica, os filmes apresentam atenuações com menor amplitude porém em toda faixa de frequências estudada (8 - 12GHz), atingindo valores de 20% de atenuação. Desta forma é possível concluir que os filmes obtidos podem ser utilizados como materiais absorvedores de radiação eletromagnética e apresentam mecanismos de atenuação que são dependentes da espessura do recobrimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Processo n. 05-01258-05), ao FINEP (Processo n.1757-03) e ao CNPq (Processos n. 301583/2006-3 e 311396/2006-2) pelo suporte financeiro, à UDESC pelo auxílio para a obtenção dos filmes finos e a Divisão de Materiais/IAE/CTA pela realização das análises para caracterização dos recobrimentos.

REFERÊNCIAS

- LEE, S.M., *International Encyclopedia of Composites*. vol.6, VHC Publishers, New York, 1991.
- JOHNSON, R.N., *The International Countermeasure Handbook*. 11th edition. E.W. Communications, Palo Alto, CA., USA, 1992.
- EMERSON, W.H., *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 21 (1973) 383.
- NIE, Y.; HE, H.H.; GONG, R.Z.; ZHANG, X.C., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 310 (2007) 13.
- BREGAR, V.B., *IEEE Transactions on Magnetics* 40 (2004), 1679.
- REZENDE, M.C.; SILVA, F.S.; MARTIN, I.M., *Spectrum* 2 (2000) 17.
- SLEMING, W.J., *An Introduction to Microwave Absorbent Materials*. Plessey Materials.
- HASHISH, E.A., *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 16 (2002) 227.
- MIKHAILOVSKY, L.K., *VIII International Conference on Spin Electronics – Section of International Conference on Gyromagnetic Electronics and Electrodynamics*, Moscow, Rússia, 1999.
- BALAGEAS, D.; LEVESQUE, P., *Rev. Gén. Therm.* 37 (1998) 725.
- FOLGUERAS, L.C.; REZENDE, M.C., *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference*, Brazil., 2007, 483-487.
- NOHARA, E.L. *Materiais Absorvedores De Radiação (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos*, Tese de Doutorado (2003), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos (SP).
- BHAT, K.S.; DATTA, S.K.; SURESH, C., *Thin Solid Film* 332 (1998) 220.
- OHRING, M., *The Materials Science of Thin Films*, Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey, Academic Press, San Diego, 1991, p. 531.
- KAISER, K.L., *Electromagnetic Compatibility Handbook*, CRC Press, 2004, p. 21.
- Word wide web: http://www.ndtd.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity_Al.pdf access in 07/05/2008.
- FONTANA, L.C.; MUZART, J.L.R., *Surface and Coatings Technology* 107 (1998) 24.
- SHUBIN, V.A.; SARYCHEV, A.K.; CLERC, J.P.; SHALAEV, V.M., *Physical Review B* 62 (2000) 230.