

Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética de baixos peso e volume constituídos de filmes finos metálicos

V.L.Soethe^{1,2*}, E.L.Nohara², L.C.Fontana³, M.C.Rezende⁴

¹ ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Praça Marechal do Ar Eduardo Gomes, nº 50, Vila das Acácias, 12228-900, São José dos Campos, SP, Brasil.

² Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Daniel Danelli, s/n, 12060-040, Taubaté, SP, Brasil.

³ Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Física, Campus Universitário Professor Avelino Marcante, s/n, 89223-100, Joinville, SC, Brasil.

⁴ Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais, Pça. Mal. Eduardo Gomes, nº 50, Vila das Acácias, 12228-900 - São José dos Campos, SP, Brasil.

Resumo — Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) são frequentemente utilizados para minimizar problemas de compatibilidade e interferência eletromagnética em equipamentos eletroeletrônicos, bem como para a redução de assinatura radar de plataformas militares. Entretanto, a utilização de MARE convencional geralmente promove um aumento em termos de peso e volume à superfície na qual é aplicado, tornando uma desvantagem de sua utilização, principalmente na indústria aeronáutica. O presente trabalho refere-se ao estudo de obtenção de MARE com alta eficiência, apresentando baixos valores de peso e espessura, constituídos de filmes finos metálicos, depositados sobre substratos poliméricos. Os recobrimentos metálicos obtidos neste estudo apresentam atenuações acima de 90% em toda a faixa de frequências, com gramaturas da ordem de 40 a 100 g/m² e espessuras do conjunto filme/substrato da ordem de 100 a 300 µm.

Palavras-chaves — controle de assinaturas, materiais absorvedores de radiação eletromagnética, filme fino.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso de radiação eletromagnética na faixa de frequências de micro-ondas tem 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, dentre outros fatores, com o intuito de reduzir possíveis danos causados pela incidência desta radiação em seres vivos. Os MARE apresentam ainda aplicações civis e militares, dentre as quais pode-se citar: blindagem eletromagnética de equipamentos utilizados nas indústrias automotivas, aeroespacial, militar e de equipamentos eletroeletrônicos, além de sistemas de comunicação sem fio [1]-[8].

Basicamente, um MARE transforma a energia da onda eletromagnética em calor, sendo classificados em dois grupos principais: MARE baseados em centros absorvedores de perdas dielétricas e magnéticas.

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 materiais baseados em centros absorvedores de perdas magnéticas são caracterizados pela interação do campo magnético da onda eletromagnética incidente com o material. Os MARE tradicionais frequentemente apresentam espessuras da ordem de milímetros-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 absorvedores convencionais reside no fato de apresentarem baixo peso e pequena espessura. Como é conhecido, estruturas metálicas normalmente apresentam características de reflexão da radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas. Deste modo, a obtenção de absorvedores baseados em filmes finos metálicos causa, inicialmente, certa estranheza, uma vez que esses materiais possuem a propriedade de refletir esta radiação, devido à tendência em manter o campo elétrico em sua superfície nulo [11],[12].

A propriedade de atenuação por recobrimentos metálicos está relacionada, principalmente, com o tipo de material que constitui o filme e com a espessura desses recobrimentos [13]. Basicamente, o processo de atenuação da energia da radiação eletromagnética por filmes finos tem relação com o fenômeno de *skin depth* (camada pelicular). Esta camada representa a espessura na qual os campos elétrico e magnético da onda eletromagnética incidente tem sua amplitude reduzida em 1/e do valor inicial, sendo “e” a base do logaritmo natural (número de Euler) [11],[14]. De acordo com a literatura, para que materiais metálicos apresentem característica de atenuação da radiação eletromagnética, é necessário que possuam espessuras inferiores ao valor da camada pelicular [15]. Nesta situação, ocorre a penetração da onda eletromagnética na superfície, conduzindo ao surgimento de correntes elétricas no seu interior, as correntes de *Eddy* [16]-[19]. Quando estas correntes surgem, o material pode, por meio de sua estrutura atômica e dos defeitos na rede cristalina, transformar a energia da onda eletromagnética

* V.L.Soethe, vivianes@ita.br, Tel: +55-12-39476471, FAX: +55-12-39476405, E.L.Nohara, evandro@unitau.br, Tel: +55-12-39264100, L.C.Fontana, dfi2lcf@joinville.udesc.br, Tel: +55-47-40097855, M.C.Rezende, mirabel@iac.cta.br, Tel. +55-12-39476420. Este trabalho é financiado pela FAPESP (Processo n. 05-01258-05), FINEP (Processo n.1757-03) e CNPq (Processos n. 301583/2006-4, 311396/2006-2, 150736/2009-6).

incidente em calor, por meio do espalhamento dos elétrons presentes nessa corrente de condução. Desta forma, verifica-se uma redução no sinal da onda que retorna ao detector e, conseqüentemente, a atenuação da energia incidente na superfície metálica.

Materiais absorvedores compostos por filmes finos podem ser atualmente considerados como tecnologias inovadoras em diversos setores da ciência e da indústria, pois essas estruturas, comparados com os materiais convencionais, apresentam uma drástica redução em suas massa e espessuras. Do ponto de vista da indústria aeronáutica, o desenvolvimento deste tipo de material promove uma redução na massa agregada à plataforma aérea com menor intervenção em termos estruturais e aerodinâmicos. Avaliando-se as aplicações civis, verifica-se, por exemplo, na indústria de telecomunicações, a necessidade de elaboração de materiais absorvedores eficientes, leves e finos, uma vez que a busca pela redução destes equipamentos é constante, e os materiais agregados aos mesmos devem acompanhar essa tendência. Considerando-se esses fatores, verifica-se que o estudo para o desenvolvimento e compreensão dos fenômenos relativos à atenuação da radiação eletromagnética por filmes finos apresenta-se, na atualidade, como uma chave para os desenvolvimentos tecnológico e militar (no setor de defesa) do país, sendo esta uma linha de atual interesse por vários países do mundo, inclusive os desenvolvidos, como os EUA [20].

Avaliando-se a importância militar, estratégica, tecnológica e acadêmica deste assunto nos dias atuais, é apresentado neste trabalho resultados relativos à atenuação da energia da radiação eletromagnética incidente promovida por filmes finos de Ti sob a forma de mono e multicamadas, avaliados na faixa de frequências de 8-12 GHz (banda X do espectro eletromagnético).

II. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Filmes finos de Ti foram depositados sobre substratos de poli(terefalato de etileno) com espessura de 0,1mm, utilizando-se um equipamento do tipo *Triodo Magnetron Sputtering*. A Fig. 1 mostra o esquema do aparato experimental utilizado para obtenção dos recobrimentos metálicos.

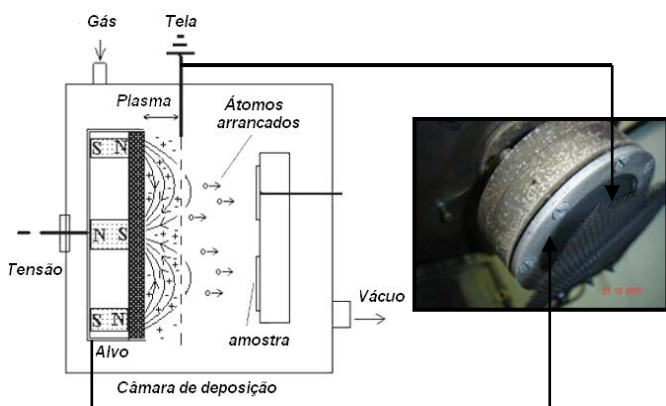


Fig. 1. Esquema experimental utilizado para a realização das deposições dos filmes finos metálicos.

Este processo se difere do *Magnetron Sputtering Convencional* pela 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 menores (2,0 mTorr 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 [21]. A utilização desta tela favorece um maior controle da energia das partículas que se depositam, possibilitando desta forma, realizar a deposição de filmes metálicos sobre superfícies sensíveis à elevação de temperatura, como os polímeros [22].

Os filmes foram depositados sob a forma de multicamadas de um mesmo elemento. Tal processo visou avaliar a influência do número de camadas metálicas e suas respectivas espessuras nas propriedades de atenuação da energia da onda eletromagnética incidente promovida pelo conjunto.

A atenuação da energia da onda eletromagnética pelos recobrimentos metálicos foi medida com o auxílio de um equipamento de refletividade em guia de ondas, utilizando um analisador vetorial de redes (Hewlett Packard 8510). O guia de ondas é um dispositivo construído com alta precisão mecânica, onde a onda eletromagnética se propaga em um sistema fechado [23]. Este sistema de medidas consta, basicamente, de um guia de ondas com um terminal para o gerador de sinais e um para o analisador de espectro. Foram realizadas ainda, sobre os recobrimentos, análises de espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS), de forma a verificar, quantitativamente, a composição química dos recobrimentos e a influência da mesma nas propriedades de atenuação [24]. Para a realização das análises por meio desta técnica fez-se uso de um ambiente de ultra-alto vácuo, empregando-se a radiação K α do magnésio como fonte excitadora, com energia de 1253,6 eV e potência de 30 W (voltage de 6 kV e emissão de 5 mA).

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig.2 apresenta o gráfico referente à atenuação, em porcentagem, dos filmes finos de Ti, constituídos de uma única camada, com diferentes espessuras, em função da frequência da onda incidente.

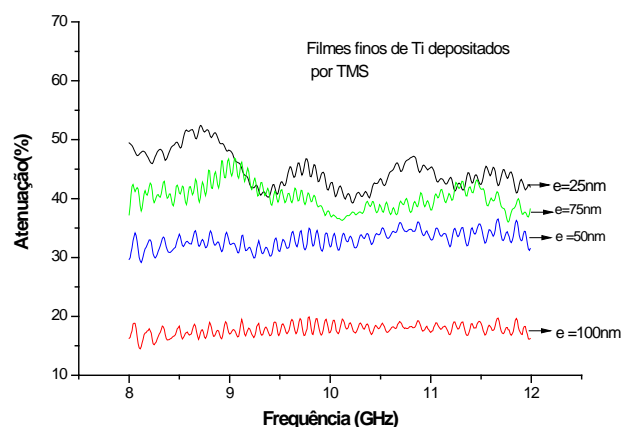


Fig. 2. Atenuação da radiação eletromagnética promovida pelos filmes finos de Ti compostos de uma única camada, com diferentes espessuras.

Como mostra a Fig.2, a espessura do recobrimento é um fator fundamental para a atenuação apresentada pelos mesmos. Espessuras da ordem de 25 nm apresentam atenuações

significativas, acima de 45% em toda a faixa de frequências. Verifica-se ainda que filmes com espessuras da ordem de 100 nm apresentam comportamento refletor. Este fenômeno ocorre, pois, para maiores espessuras, o filme apresenta propriedades similares às apresentadas pelo material em sua forma volumétrica. As diferenças em termos da atenuação da energia da radiação incidente podem ser associadas à resistência superficial apresentada pelos recobrimentos metálicos, uma vez que este parâmetro influi diretamente sobre o valor do *skin depth* (δ) do filme em uma determinada frequência. Este parâmetro pode ser obtido por meio de (1) [25].

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

onde: σ é a condutividade do material que constitui o filme, f a frequência da onda eletromagnética incidente e $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$, a permeabilidade magnética do ar [26]-[27].

Para calcular os valores de δ , fez-se uso dos valores de resistividade (ρ - inverso da condutividade), obtidos por meio da análise dos filmes finos em equipamento de resistividade em quatro pontas. Com este equipamento foi possível ainda obter os valores da resistência elétrica (R) dos filmes, sendo esta propriedade função da espessura, do grau de pureza e de defeitos dos recobrimentos. Os resultados obtidos na análise de resistividade em quatro pontas podem ser observados na Tabela I.

TABELA I: Dados obtidos por meio de análise em equipamento de resistividade em quatro pontas.

Espessura (nm) ± 5	R (Ω)	$\rho \times 10^{-6}$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	$\delta \times 10^{-5}$ (m) ($f = 8 \text{ GHz}$)
25	117	132	6,47
50	28,0	6,34	1,41
75	19,7	6,69	1,45
100	6,51	2,53	0,89

Na Tabela I, δ é apresentado apenas para a frequência de 8,0 GHz. As demais frequências do espectro analisado seguem a mesma tendência. De acordo com a Tabela I é possível verificar uma redução na resistência elétrica superficial dos recobrimentos com o aumento da espessura. Este aumento na resistência tem relação direta com a atenuação apresentada pelos recobrimentos, uma vez que a superfície metálica necessita apresentar pontos de espalhamento para os elétrons da corrente de condução formada nesta superfície (correntes de *Eddy*) para promover processos de atenuação da energia incidente. Verifica-se um comportamento semelhante para os valores de resistividade obtidos.

Os valores da camada pelicular calculados para a frequência de 8,0 GHz mostram que para maiores espessuras, há a ocorrência da redução dos valores de δ dos filmes de Ti. A Fig.3 apresenta um gráfico da tendência da variação de δ em função da espessura do recobrimento. Fazendo-se uma aproximação por uma distribuição conhecida, verifica-se que δ pode ser descrito em termos de uma exponencial decrescente (curva em vermelho), cuja equação genérica é dada em (2).

$$y = A_1 \cdot \exp(-x/t_1) + y_0 \quad (2)$$

onde: y_0 , A_1 e t_1 são constantes obtidas por meio da curva de aproximação e x e y , os valores relativos as espessuras do filme e da camada pelicular, respectivamente.

Pode-se por meio desta aproximação, verificar a relação existente entre a espessura do recobrimento e a espessura da camada pelicular para uma dada frequência, e relacionar tais parâmetros com a atenuação apresentada por estes recobrimentos.

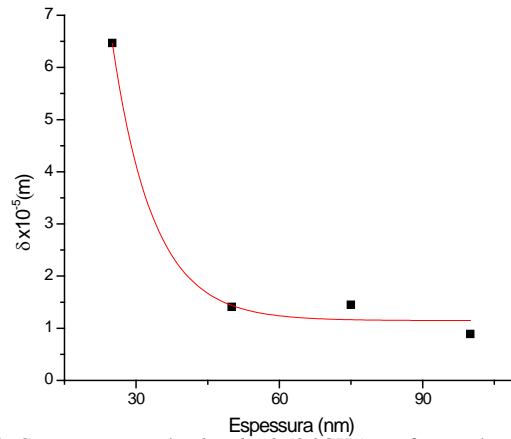


Fig. 3. Comportamento do *skin depth* (8,0GHz) em função da espessura do recobrimento (aproximação exponencial – curva em vermelho)

Avaliando-se os resultados obtidos, pode-se observar que, para que seja promovida uma atenuação mais eficiente é necessário que a espessura do recobrimento seja menor que 0,5% do valor da espessura da camada pelicular. Este resultado vem de encontro com os dados da literatura [15].

Análises de Espectroscopia de fotoelétrons excitados por Raios X (XPS) foram realizadas sobre os filmes de Ti com diferentes espessuras. Verificou-se por meio destas análises a formação preferencial e predominante de TiO_2 , com energia de 458,3 eV, valor este referente ao $\text{Ti } 2p_{3/2}$ [28]. Este composto foi formado, provavelmente, durante o processo de deposição, devido à presença do oxigênio existente no gás residual. O TiO_2 é um composto cerâmico, que quando produzido a baixas temperaturas apresenta-se na fase anatásio, tetragonal. Sendo assim, possui alta constante dielétrica e resistência elétrica, características estas que o capacita para ser empregado em várias aplicações [29]. As análises de XPS realizadas sobre os recobrimentos apontaram uma formação de 84% de TiO_2 no filme com espessura de 25 nm, ao passo que os recobrimentos com 50 e 75 nm, apresentaram, respectivamente, 83 e 81% de TiO_2 . Esta pequena diferença em termos da quantidade de TiO_2 formada na superfície do filme é, possivelmente, responsável pelas diferenças em termos da atenuação da energia por esses apresentadas, uma vez que esta camada de óxido é altamente resistiva, vindo a contribuir para o espalhamento da corrente de superfície e a transformação da energia incidente em calor. Esta afirmação pode ser verificada analisando-se os valores de resistência elétrica dos recobrimentos na Tabela I. Filmes com maior presença de TiO_2 (25 nm) apresentam maior resistência e resistividade elétrica, tendo sua atenuação influenciada por este parâmetro.

Avaliando-se a eficiência apresentada por uma monocamada de filme metálico depositado sobre um substrato polimérico, realizou-se a deposição de multicamadas de Ti, sobrepostas. O recobrimento formado por multicamadas foi obtido por meio do crescimento de monocamadas individuais,

sobrepostas umas as outras, depositadas utilizando-se intervalos de tempo iguais. Como os parâmetros de deposição foram mantidos, sem realizar-se a quebra do vácuo, no sistema, a espessura destes recobrimentos que compõem o sistema multicamadas manteve-se praticamente constante.

A Fig.4 apresenta um gráfico referente à atenuação da radiação eletromagnética em função da frequência da onda incidente, para os filmes multicamadas de Ti depositados sobre substratos poliméricos.

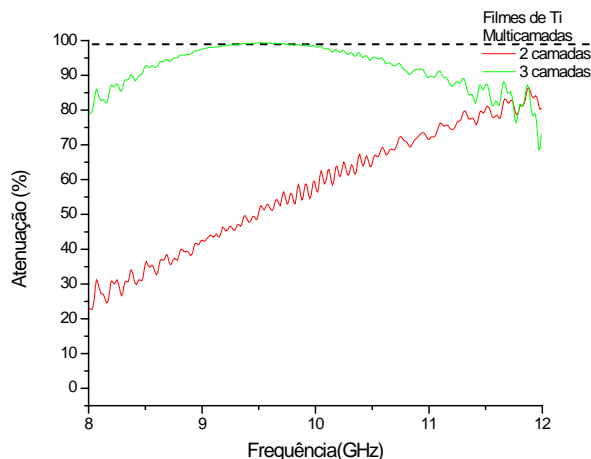


Fig. 4. Atenuação apresentada pelos filmes de Ti compostos de duas (curva em vermelho) e três (curva em azul) camadas metálicas em função da frequência da onda incidente.

De acordo com a Fig.4 observa-se que a utilização de sistemas multicamadas amplia a atenuação apresentada pelos recobrimentos metálicos, atingindo valores acima de 90%. Além disso, verifica-se que, no caso de sistemas compostos por três camadas metálicas, a atenuação ocorre em toda a faixa de frequências analisada, caracterizando atenuação em banda larga. A simples sobreposição das camadas amplia, para uma dada faixa de frequências, a eficiência, em termos de atenuação da energia da radiação incidente, do conjunto substrato/multicamadas metálicas. A explicação para este comportamento reside no fato de que, com este arranjo, ocorre uma adição das propriedades atenuadoras dos filmes constituídos por apenas uma camada, resultando em uma expansão na atenuação final do conjunto. Tal efeito deve ser tão mais pronunciado quanto maior for a quantidade de camadas de recobrimentos adicionada. Pode-se observar com estes resultados que a utilização de multicamadas de filmes finos sobre substrato polimérico viabiliza a confecção de absorvedores de radiação eletromagnética finos, leves e maleáveis, com possibilidade de serem moldados sob superfícies com geometrias complexas, apresentando alta eficiência de atenuação.

IV. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados no presente trabalho, conclui-se que filmes finos metálicos apresentam-se promissores para serem utilizados como MARE, devido principalmente, à sua alta eficiência, associada às características de baixo peso e pequena espessura. A amplitude da atenuação está relacionada com a espessura do recobrimento, bem como com a camada de óxido formada em sua superfície. De acordo com os estudos realizados, para que os recobrimentos metálicos sejam eficientes quanto à

atenuação da radiação eletromagnética incidente é necessário que possuam espessura inferior à espessura da camada pelicular na frequência de interesse. Dados experimentais têm demonstrado que a espessura da camada pelicular pode ser descrita como uma função exponencial em função da espessura do recobrimento, sendo o valor destas espessuras fundamental para a atenuação apresentada pelo filme fino. Além disso, a utilização de sistemas multicamadas evidencia que atenuações acima de 90%, em banda larga, podem ser conseguidas utilizando-se recobrimentos metálicos depositados sobre polímeros, e que a quantidade de camadas utilizada influencia diretamente no comportamento apresentado pelo conjunto.

REFERÊNCIAS

- [1] S.M. Lee, *International Encyclopedia of Composites*. vol.6, VHC Publishers, New York, 1991.
- [2] R.N. Johnson, *The International Countermeasure Handbook*. 11th edition.
- [3] W.H. Emerson, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 21 (4), (1973), 383-388.
- [4] Y. Nie, H.H. He, R.Z. Gong, X.C. Zhang, *Journal of Magnetism and magnetic materials*, 310, (2007), 13-16.
- [5] V.B.Bregar, *IEEE Transactions on Magnetics*, 40 (3), (2004), 1679-1684
- [6] M.C. Rezende, F.S. Silva, I.M. Martin, *Spectrum*, (2005).
- [7] W.J. Fleming, *Technical Reference from Plessey Materials*.
- [8] E.A. Hashish, *Journal of Electromagnetic waves and Appl*, 16 (2), (2002), 227-241.
- [9] L. K. Mikhailovsky, *VIII International Conference on Spin Electronics – Section of International Conference on Gyromagnetic Electronics and Electrodynamics*, Moscow, Rússia, 1999.
- [10] D. Balageas; P. Levesque, *Rev. Gén. Therm.*, 37,(1998)
- [11] N. Ishii, Y. Yasaka, *U.S. Patent N° 6823816*, 2004
- [12] E. Mayes, *US Patent N° 6986942*, 2006.
- [13] V.L. Soethe, Filmes finos absorvedores de microondas obtidos pelo processo de deposição física em fase vapor, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, *Tese de Doutorado*, São José dos Campos, SP, 2009.
- [14] F.J. Owens, C.P. Pode, *Spring*, 1999
- [15] Permafrost: North American Contribution to the Second International Conference, *Building Research Advisory Board Staff*, National Academy of Sciences (U.S.), 1973.
- [16] H. Bosman, Y.Y. Lau, R.M. Gilgenbach, *IEEE Transactions on Plasma Science*, v.32 (3), 2004.
- [17] V.A. Shubin, A.K. Sarychev, J.P. Clerc, V.M. Shalaev, *Physical Review B*, v.62 (16), 2000.
- [18] H. Bosman, Y.Y. Lau, R.M. Gilgenbach, *Applied Physics Letters*, v.82 (9), pp.1353, 2003.
- [19] R.L. Cravey, L.C. Schroeder, M.J. Scherner, C.P. Hearn, H.J.C. Blume, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 3741, 1995.
- [20] *Military Critical Technology List*, Section 18: Signature Control Technology, Department of Defense to USA, 2004
- [21] L.C. Fontana, J.L.R. Murart, *Surface & Coatings Technology*. v 107, pp.24-30, 1998.
- [22] V.L. Soethe, Deposição de filmes metálicos sobre poli (Tereftalato de Etileno) via Triodo-Magnetron-Sputtering: influência da corrente e da voltagem nas propriedades dos filmes. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Joinville, 2004.
- [23] A.M. Nicholson, G. Ross. *IEEE Trans. Instrum. Measure*. v. 19, p. 377, 1970.
- [24] P.A.P. Nascente, *J. Molec. Catal. A: Chemical*, v. 228, pp. 145-150, 2005.
- [25] K. S. Bhat; S. K. Datta, C. Suresh, *Thin Solid Film*, 332 (1998), 220-224.
- [26] K.L. Kaiser, *Electromagnetic Compatibility Handbook*, CRC Press, 2004, p. 21-23.
- [27] World wide web: http://www.ndtd.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity_AI.pdf acessado em 07/05/2008.
- [28] J.F. Mouledier, W.F. Stickle, P.E. Sobol, K.D. Bomben, *Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy*, Physical Electronics Division, Eden Prairie, Minnesota, EUA, 1992.
- [29] A.C.F.M. Costa, M.A. Vilar, H.L. Lira, R.H.G.A. Kiminami, L. Gama, *Cerâmica*, v.52 (324), 2006.