

FILME FINO DE Fe-Cr-Al: ANÁLISE EXPERIMENTAL DE INTERAÇÕES COM MICROONDAS, MORFOLOGIA E MICROESTRUTURA

Samuel Machado Leal da Silva^{ab}, Carlos Luiz Ferreira^b*

^aCentro Tecnológico do Exército (CTEx), Av. das Américas, 28705 – Guaratiba
Rio de Janeiro – RJ.

^bSeção de Engenharia Mecânica e de Materiais (SE/4) – Instituto Militar de Engenharia (IME)
– Praça General Tibúrcio, 80, Urca, 22.290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

* lealsam@click21.com.br

ABSTRACT

Microwave absorbing materials based on thin films are important solutions to shielding electromagnetic noise and support the radar cross section reduction. Films of Fe-Cr-Al (Kanthal) with thicknesses of 20.0 nm - 112.2 nm were deposited on Mylar substrates by evaporation “flash” without heating the substrate and pressure of 2×10^{-6} Torr. The morphology and microstructure were analyzed by means of SEM and XRD respectively, and subjected to reflection and transmission measurements in the microwave X band. It was found that the films are nanocrystalline, had a maximum absorption of 48% in thickness of 29.2 nm and had approximately the same level of interaction over the range 8-12 GHz. Thickness of 86.2 nm presented the largest “shielding effectiveness” equal to 95%. The results assume that there is a condition of thick-structure-morphology more favorable to absorption and another condition sufficient for obtaining a good shielding.

Keywords: thin film, microwaves, absorbers, shielding.

RESUMO

Materiais absorvedores de micro-ondas baseados em filmes finos são soluções importantes para blindar ruídos eletromagnéticos e reduzir a seção de choque para o radar. Filmes de Fe-Cr-Al (Kanthal) com espessuras entre 20,0 nm e 112,2 nm foram depositados em substratos de Mylar por evaporação “flash” sem aquecer o substrato, a uma pressão de 2×10^{-6} Torr. A morfologia e microestrutura foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X, respectivamente, e submetidas a medidas de reflexão e transmissão na banda X de micro-ondas. Foi observado que os filmes são nanocristalinos, apresentam uma absorção máxima de 48% para uma espessura de 29,2 nm e têm aproximadamente o mesmo nível de interação na faixa de 8 a 12 GHz. A espessura de 86,2 nm apresen-

tou a melhor “efetividade da blindagem”, igual a 95%. Os resultados sugerem que exista uma condição de morfologia, estrutura e espessura que seja mais favorável à absorção e outra condição para obter uma boa blindagem.

Palavras-chave: filmes finos, micro-ondas, absorvedores, blindagem.

INTRODUÇÃO

Materiais absorvedores têm sido propostos a partir de matrizes poliméricas impregnadas com aditivos que, corretamente processados, geram um meio que impõe altas perdas aos campos eletromagnéticos incidentes, ou ainda, são tradicionais estruturas que impõem atenuações às ondas que incidem sobre elas por meio de cancelamentos por interferência destrutiva das múltiplas reflexões internas. Entretanto, estas estruturas são, em geral, espessas, pesadas e pouco flexíveis (Silva, 2004).

Com a miniaturização dos modernos sistemas de telecomunicações e dos produtos da indústria de eletroeletrônicos torna-se necessário obter materiais que possam solucionar os problemas de compatibilidade eletromagnética através da absorção dos sinais indesejados ou do isolamento dos componentes do sistema por blindagens eletromagnéticas, mas que não sejam incompatíveis com esta realidade de tamanhos e pesos reduzidos. Para isso, propõe-se nesse trabalho um estudo com materiais que tenham o compromisso de se caracterizarem como materiais flexíveis, de baixo peso, extremamente finos e que tenham ainda a capacidade de interação com a radiação eletromagnética a ponto de se comportarem como absorvedores ou, ainda, como blindagens (Silva, 2004).

TEORIA

Materiais Absorvedores de Radiação

Coerente com o que já foi mencionado, materiais absorvedores são meios capazes, por algum mecanismo, de transformar a energia eletromagnética incidente em outra forma de energia. Em alguns casos isso ocorre por cancelamento passivo dos sinais presentes internamente à estrutura em estudo e em outras ocasiões a perda ocorre pela geração de correntes no material, o que proporciona a perda na forma de calor (Silva, 2004).

Um modelo apropriado à interpretação da distribuição das interações de uma radiação eletromagnética (sendo E_i um sinal incidente qualquer, E_r o sinal refletido, E_a o sinal absorvido e E_t o sinal transmitido) que trafega em um meio extenso e encontra a interface de um segundo meio, é ilustrado na Figura 1 (Kraus, 1991).

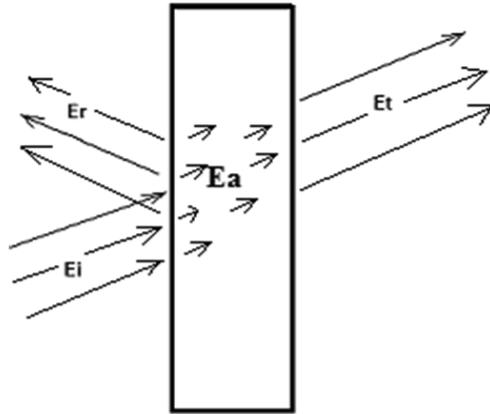


Figura 1 – Componentes de sinal na interação com o material.

As interações ilustradas na Figura 1 são interrelacionadas pela equação (1), na qual a soma de todas as componentes resulta em um sinal incidente à superfície do material.

$$E_i = E_a + E_r + E_t \quad (1)$$

É necessário verificar que a eficácia de um material absorvedor está relacionada a sua capacidade de absorver a radiação incidente, refletindo-a e transmitindo-a o menos possível. Em geral, devido às aplicações mais usuais destes materiais, eles são ancorados sobre superfícies metálicas para reduzir as reflexões da estrutura (Radar Cross Section – RCS) em questão, tal qual ocorre quando são utilizados em plataformas de combate “stealth”, absorvendo os sinais radar. Neste caso, há muito interesse na obtenção de grande capacidade de absorção por parte do material em conjunto com baixa reflexão. Se o material possuir grande capacidade de absorção e transmissão, a primeira será potencializada pelo fato da energia transmitida sofrer absorção também no retorno, após refletir no fundo metálico sobre o qual está o material absorvedor (Balanis, 1989; Kraus, 1991; Silva, 2004).

Considerando-se um material desse tipo, porém que tenha uma espessura muito menor do que o comprimento de onda, pode-se desconsiderar os efeitos de múltiplas reflexões. Nesta situação se encaixam os filmes finos absorvedores e a avaliação do material toma por base o que descreve a equação (2) (Chatterton; Houlden, 1996):

$$E_i = E_a + E_t, \quad (2)$$

dado que o sinal refletido deva ser desprezível (E_r maior possível).

Com base na modelagem apresentada até aqui, normalizando a equação (1) com relação a E_i , pode-se utilizar a equação (3) para calcular o percentual de absorção de cada filme. Veja que A (absorção percentual do sinal) é função, neste caso, dos valores medidos de reflexão de sinal (R) e de transmissão de sinal (T) percentuais.

$$A = 1 - R - T \quad (3)$$

Com a proposta da equação (2), torna-se importante compreender as propriedades do material que proporcionam a penetração da radiação transmitida. Assim, em um condutor a profundidade de penetração de um campo eletromagnético (δ) está relacionada com o tempo de relaxação das cargas. Esta profundidade corresponde à profundidade pelicular e, neste caso, a película corresponde a uma espessura tal que o campo transmitido decai para 1/e ou 37% da amplitude de campo na superfície. Representa-se esta profundidade pelicular (skin depth) por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}, \quad (4)$$

tal que ω corresponde à frequência angular do sinal incidente, μ é a permeabilidade magnética do material e σ é a condutividade elétrica DC deste mesmo material.

Blindagens Eletromagnéticas

As blindagens são uma forma de resolver problemas de compatibilidade de sistemas eletrônicos. Problemas de compatibilidade podem ser solucionados por meio de modificações no projeto da fonte de ruído ou do projeto da “vítima” do ruído gerado, ou ainda, pode-se agir sobre o canal entre os sistemas interferente e interferido. Neste último caso, quando não é viável alterar o projeto do sistema avaliado, atua-se sobre o canal (meio) utilizando blindagens.

Conceitualmente, o que a blindagem apresenta como diferença em relação aos materiais absorvedores é o fato de que, neste caso, importa a razão entre a potência de sinal (ruído) recebida, antes de se interpor uma blindagem, e o valor medido após utilização da blindagem. Resumidamente, é uma relação entre a potência incidente e a transmitida. Isso define o conceito de Efetividade da Blindagem (“Shielding Effectiveness” - SE) o que se pode verificar na equação (5) (Chatterton; Houlden, 1996):

$$SE = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_t} \right), \quad (5)$$

sendo P_i e P_t as potências de sinal incidente e transmitido.
Ou em termos percentuais:

$$SE(\%) = P_i(\%) - P_t(\%) \quad (6)$$

MATERIAIS E MÉTODOS

Processamento dos filmes

A técnica empregada na produção dos filmes finos de Fe-Cr-Al (Kanthal) foi a evaporação resistiva tipo “flash”. Neste caso, as espessuras dos filmes foram obtidas com base nas massas de Kanthal para cada amostra.

Os substratos poliméricos (Mylar®) utilizados foram cortados com dimensão de (5x5) cm². Tais substratos passaram por um processo de limpeza com éter de petróleo, sabão neutro, álcool isopropílico, água destilada e deionizada. Após a limpeza, passaram por secagem em estufa e sob radiação infravermelha por duas horas.

No processamento dos filmes, fixaram-se os substratos em um suporte dentro do sistema de deposição de uma evaporadora Edwards, modelo 19A. Para a deposição, utilizou-se correntes entre 35 – 40 A, uma fonte de tungstênio e uma pressão base de 2×10^{-6} Torr.

Espessura

Após as deposições, todos os filmes tiveram as suas espessuras medidas (conforme Tabela 1) pelo método de interferometria óptica, utilizando-se um interferômetro modelo 980-4000 Å-Scope, serial 287, fabricado pela Varian.

Morfologia e Microestrutura

Nas análises morfológicas, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura - MEV com FEG (“Field Emission Gun”), modelo Supra-40, fabricado pela Carl Zeiss.

Para o exame da microestrutura dos filmes de Kanthal foi empregado um difratômetro da Shimadzu, modelo XRD-7000, com fonte de cobre, pertencente ao Projeto Carbono, no CTEEx. Apesar de não ser a técnica mais adequada ao tipo de amostra, utilizou-se θ - 2θ desacoplado. Nestes ensaios foram ajustados os seguintes parâmetros: tensão de aceleração de 40 kV, corrente de elétrons de 30 mA, passo de $0,01^\circ$ e na faixa de ângulos de 10 a 80° .

Refletância, Transmitância e Absorbância

As medidas de reflexão e transmissão de microondas foram realizadas em um sistema composto por guia de ondas Agilent, adaptadores coaxial – guia de onda do tipo WR 90, cabos coaxiais de precisão e analisador de rede da Anritsu, modelo 37247D, tal qual ilustrado na Figura 2 (Bhat et al., 1998; He et al., 2007). A absorção foi obtida indiretamente por meio da equação (3).

Em P1 foi gerado o sinal que incidiu nas amostras, para na seqüência receber na mesma porta P1 a componente refletida e em P2 a componente transmitida. De forma análoga, ocorre no sentido contrário a partir de geração do sinal incidente em P2, mas para efeitos deste trabalho apenas foi necessário considerar o primeiro caso, pois os filmes analisados neste trabalho têm comportamento recíproco.

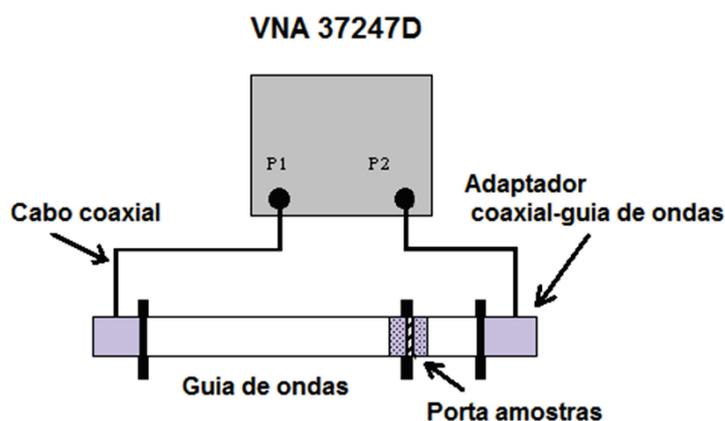


Figura 2 – Sistema de medidas de microondas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Medidas de Espessura

Após as medidas de espessura no interferômetro, os resultados foram registrados na Tabela 1. Estes resultados foram utilizados nos ensaios de microondas para a obtenção das curvas de transmissão, reflexão e absorção, possibilitando também as análises de absorção e de efetividade de blindagem para uma frequência fixa no decorrer deste trabalho.

Tabela 1 – Espessuras dos filmes finos de Kanthal depositados.

Ordem das deposições	Espessuras dos filmes de Kanthal (nm)
01	21,9
02	24,7
03	29,2
04	33,2
05	45,0
06	68,6
07	86,8
08	112,2

Morfologia e Microestrutura

Avaliando as micrografias apresentadas na Figura 3, percebe-se que para espessuras maiores ou iguais a 68,6 nm é evidente a formação de estruturas cristalinas. É possível verificar a presença de cristalitos com cerca de 20,0 nm de diâmetro.

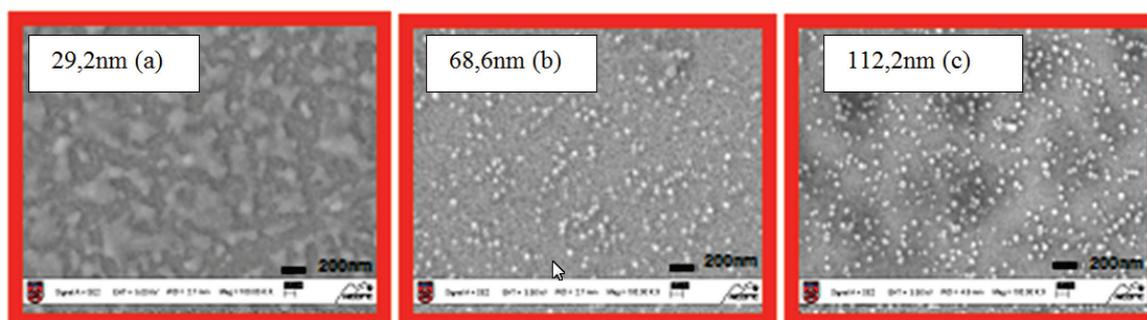


Figura 3 – Micrografias dos filmes da liga Fe-Cr-Al.

No caso do filme de 29,2 nm, notam-se estruturas que se assemelham à fase de deposição dos filmes finos correspondente à formação de ilhas (estruturas sem forma definida, cinza claro), que neste caso estão entremeadas por cristalitos (minúsculos pontos claros sobre o fundo cinza escuro) com 10 nm, menores do que aqueles evidenciados nas demais micrografias.

Os difratogramas apresentados na Figura 4 apresentam uma evidente elevação (largura entre 15° e 40°) resultante da difração do substrato polimérico (Mylar®).

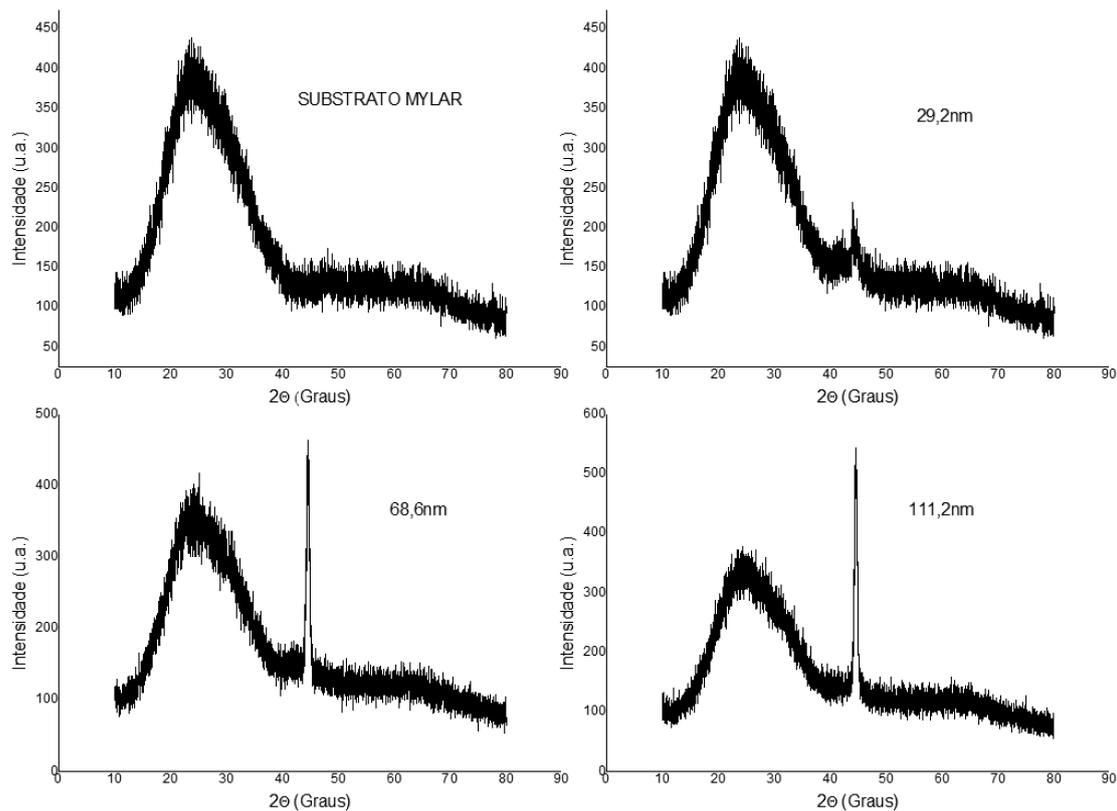


Figura 4 – DRX dos filmes da liga Fe-Cr-Al.

Os difratogramas complementam as informações obtidas a partir das micrografias da Figura 3.

Observa-se em todos os difratogramas um pico em $44,5^\circ$ (característico do Fe, principal componente da liga, conforme JCPDS 6-696). Desta forma, pode-se afirmar que todos os filmes são evidentemente cristalinos. Devido à morfologia, afirma-se que são sinais difratados de nanocristais, pois pela comparação com as barras de dimensão (200 nm) das micrografias da Figura 3, os cristalitos observados parecem ser menores do que 50,0 nm.

Medidas de Reflexão / Transmissão de Microondas

A partir do sistema de medidas de microondas foram obtidos os dados de reflexão e transmissão, utilizados na construção das curvas das Figuras 5 e 6.

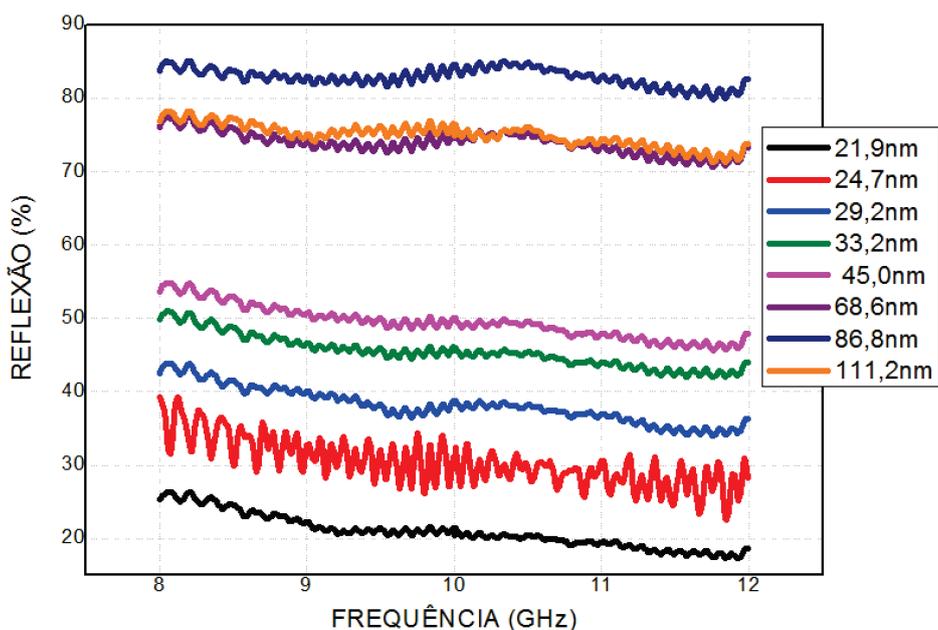


Figura 5 – Reflexão percentual da liga Fe-Cr-Al entre 8 e 12 GHz.

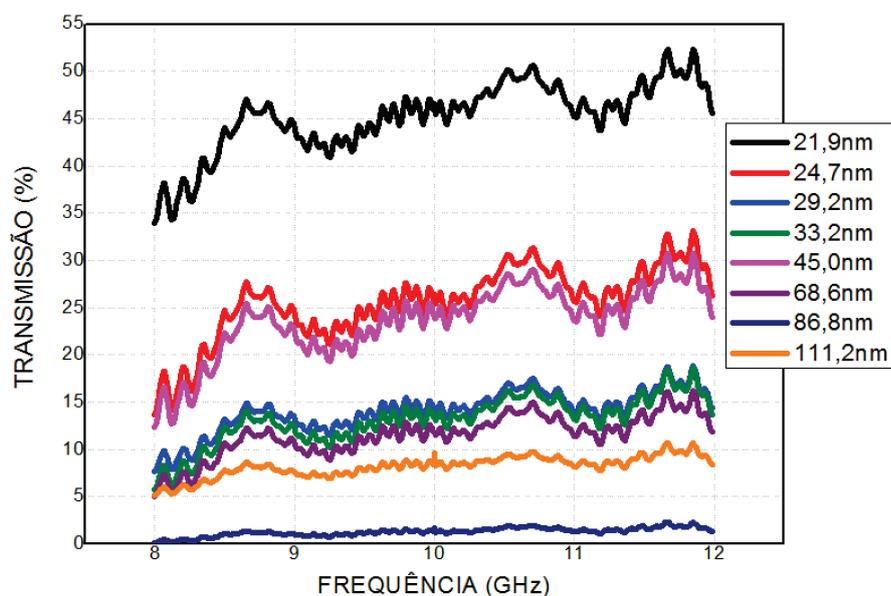


Figura 6 – Transmissão percentual da liga Fe-Cr-Al entre 8 e 12 GHz.

Verifica-se que o comportamento dos filmes ao longo da faixa de 8 a 12 GHz varia pouco, justificando afirmar que estes filmes têm um comportamento banda-larga no intervalo de frequências correspondente a banda X, uma vez que a variação dos extremos em relação à frequência central não foi maior do que 20% (ITU-R, 2006).

Utilizando a equação (3), obteve-se os valores de absorção na banda X que podem ser observados na Figura 7.

Analisando as curvas de absorção, é possível constatar mais uma vez, tal como esperado, que os filmes absorvem radiação sem grandes variações de comportamento ao longo da faixa de frequências analisada, apresentando comportamento banda-larga.

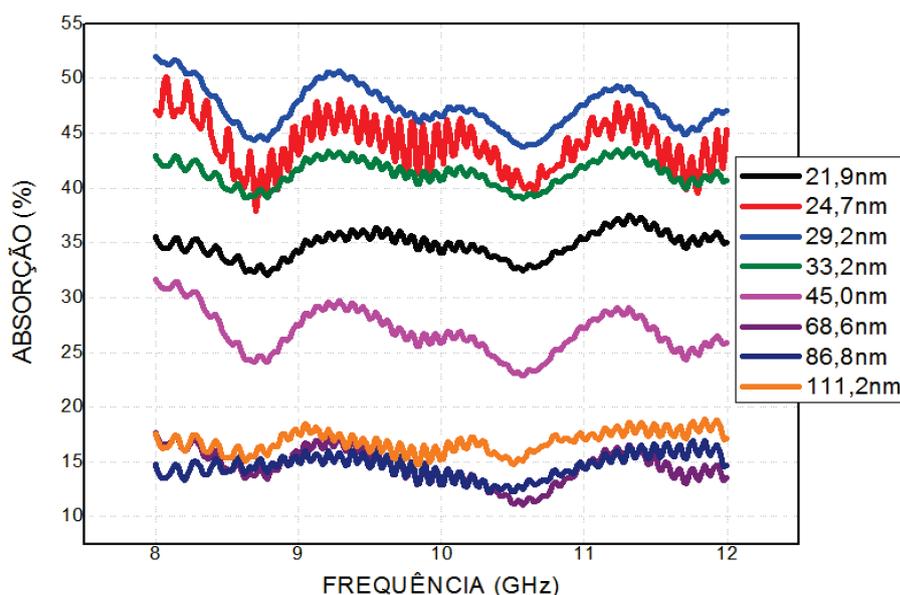


Figura 7 – Absorção percentual da liga Fe-Cr-Al entre 8 e 12 GHz.

A partir das equações (5) e (6), considerando a frequência central de análise (10 GHz), construiu-se a Tabela 2. A partir dessa tabela verifica-se que à medida que a espessura dos filmes cresce, cresce também a componente refletida. Ficou caracterizado pela tabela 2 que o filme de 86,8 nm apresentou melhor efetividade de blindagem. Pode-se afirmar inclusive que filmes a partir desta espessura parecem ser suficientes para cumprir a função de blindagens eletromagnéticas, o que pode proporcionar economia de material, pois espessuras maiores devem ser desnecessárias.

Segundo Bhat e seus colaboradores (1998), a profundidade do efeito de folha (“skin depth”) para o Kanthal em uma frequência de 10 GHz, é igual a 80,0 nm. É possível que espessuras maiores do que essa profundidade sempre apresentem bons valores de efetividade de blindagem, pois na citada profundidade a amplitude de campo eletromagnético é 37% da amplitude do campo que incidiu na superfície. Esta teoria é coerente com o dado experimental, uma vez que o filme de 86,8 nm apresentou os maiores valores de reflexão e SE.

Assim, essa proposição torna o “skin depth” uma boa referência para concepção de blindagens eletromagnéticas.

Outras observações relacionadas à blindagem podem ser obtidas a partir da equação (3), respeitando-se a profundidade de penetração. Verifica-se que materiais que apresentam altos valores de condutividade e permeabilidade magnética proporcionam menores profundidades de penetração, blindando com mais facilidade os sinais que incidem sobre a sua superfície.

Tabela 2 – Absorção (A), Reflexão (R) e Efetividade da Blindagem (SE).

Espessura (nm)	Absorção (%)	Reflexão (%)	SE (%)
21,9	34,73	20,35	55,08
24,7	43,99	29,56	73,55
29,2	46,64	38,28	84,92
33,2	40,92	45,45	86,37
45,0	26,06	49,02	75,08
68,6	13,40	74,52	87,92
86,8	13,75	84,47	98,22
112,2	15,42	74,78	90,20

Pela observação dos dados da Tabela 2 também se pode verificar que o filme de 29,2 nm apresentou maior absorção. Alia-se a este fato a reflexão relativamente baixa, o que pode significar que se este material estiver aplicado sobre um plano refletor, o efeito de absorção pode ser potencializado pela reflexão de retorno que contribuirá com mais 47% de absorção.

Aliando os dados da Tabela 2 à equação (3), pode-se afirmar que filmes de espessuras tão reduzidas quanto 29,2 nm apresentam crescente transmissão de sinal, provavelmente devido à descontinuidade desses filmes. Essas descontinuidades pressupõem obstáculos aos deslocamentos de cargas, resultando em redução da condutividade com conseqüente crescimento da profundidade de penetração, conforme equação (4), justificando o crescimento da transmissão de sinal. Isso poderá resultar em maior absorção, dependendo da morfologia e microestrutura.

Como o filme de 29,2 nm apresenta baixa cristalinidade e é composto de nanocristais, apresentando a mais favorável absorção e já que esta se reduz à medida que a espessura cresce e também crescem a cristalinidade e o tamanho dos cristalitos, é possível supor que a reduzida cristalinidade e a presença de nanocristais seja uma boa condição para a maior absorção de microondas (Silva, 2011).

CONCLUSÃO

Os filmes finos comportaram-se como absorvedores banda-larga ao longo da faixa de microondas analisada.

Filmes com espessuras maiores do que o "skin depth" apresentaram maior efetividade de blindagem.

Conforme o estudo realizado, o filme de menor amplitude de difração de raio-X e nanocristalino apresentou melhor propensão à absorção de microondas.

Filmes finos metálicos podem ser utilizados como absorvedores de microondas. As propriedades, microestrutura e morfologia têm papel importante nas interações com a radiação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALANIS, C. A. *Advanced Engineering Electromagnetics*. New York. John Wiley & Sons. 1989.
- Bhat, K.S.; Datta, S.K.; Suresh, C. *Electrical and Microwave Characterization of Kanthal Thin Film: Temperature and Size Effect*. *Thin Solid Films*. Nr 332, pg 220-224. **1998**.
- CHATTERTON, P.A; Houlden, M.A. *EMC - Electromagnetic Theory to Practical Design*. John Wiley & Sons Ltd. ISBN 047192878X. England. 1996.
- HE, Xiaodong; Wu, Cong-Feng; Dong, Sai; Pei, Yuanji. *Measurement for the Kanthal Alloy Used for Collinear Load and the S-Band Load design*. *Proceedings of 2007 Particle Accelerator Conference*. Pg 2146-2148. Albuquerque – New Mexico. USA. **2007**.
- International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R). *Recommendation ITU-R Sm.1756 (Framework for the introduction of devices using ultra-wideband technology)*. **2006**.
- KRAUS, J.D. *Eletrromagnetics*. McGraw-Hill. 4ª Ed. New York. 1991.
- SILVA, S.M.L. *Metodologia de Redução de Seção Reta Radar de Plataforma de Combate*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Centro Técnico Aeroespacial. São José dos Campos-SP. (2004). Tese de mestrado.
- SILVA, S.M.L., Ferreira, C.L. *Thin Films Of Kanthal And Aluminum For Electromagnetic Wave Absorption*. *Journal of Nanoresearch (JRN)*, Vol 14, Pg 145, **2011**.