

Aplicação do método da cavidade ressonante na análise da eficiência da absorção eletromagnética em blindagens de equipamentos eletrônicos aeronáuticos e espaciais a base dos aditivos de ferritas Mn-Zn

The application of the resonant cavity method to the analysis of the efficiency of the electromagnetic absorption of space and aviation electronic equipment shielding based on Mn-Zn ferrite additives

Análisis de la eficiencia de la absorción electromagnética en blindajes de aparatos electrónicos aeronáuticos y espaciales de los aditivos de ferritas Mn-Zn

Carlos Alberto Reis de Freitas

Doutor do Instituto de Estudos Avançados - IEAv
Divisão de Física Aplicada - Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos
São José dos Campos/SP- Brasil
careis@ieav.cta.br

Alberto José de Faro Orlando

Doutor do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA
São José dos Campos/SP- Brasil
faro@ita.br

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se uma análise de blindagem eletromagnética em equipamentos eletrônicos com relação à emissão radiada utilizando materiais absorvedores com a formulação dos aditivos de pós de ferritas Mn-Zn na faixa de frequência de GHz. Este material foi pesquisado e desenvolvido na forma de resinas pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), para aplicações aeronáuticas e espaciais, visando principalmente os veículos lançadores do programa espacial brasileiro. Foram obtidas duas cartas patentes de formulação e inovação; concluindo-se, assim, uma forma inovadora de blindagem em equipamentos eletrônicos em relação à emissão radiada. É mostrada, ainda, a aplicação da tecnologia de realização de ensaios usando a metodologia de medidas de refletividades, utilizando cavidades ressonantes, em substituição à metodologia do Arco NRL (*Naval Research Laboratory*), sendo esta uma metodologia mais eficiente e de menor custo.

Palavras-chave: Absorvedores de microondas. Ferritas Mn-Zn. Blindagem eletromagnética. Aplicações aeronáuticas.

Recebido / Received / Recebido
16/05/12

Aceito / Accepted / Acepto
21/12/12

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the electronic equipment electromagnetic shielding relative to the radiated emission using absorbing materials with the formulation of additives ferrite powders of Mn-Zn in the frequency band around Ghz. This material was designed and developed by the Institute for Advanced Studies (IEAv) in the Department of Aerospace Science and Technology (DCTA) . It is made of resins and used in applications as electromagnetic waves shielding in equipment for aviation and space with the main purpose to be applied on launcher vehicles of the Brazilian space program. It was obtained the patent letters on formulation and innovation; thus concluding a new innovative way of shielding in electronics in relation to radiated emission that operate in this sector. It also demonstrates a new technology for testing using the methodology of reflectivity measurement, which uses resonant cavities methods. This new methodology replaces the methodology Arch NRL (Naval Research Laboratory) and proves to be more efficient with a lower cost.

Keywords: Absorbers of microwaves. Mn-Zn ferrites. Electromagnetic shields. Aeronautical applications.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis de blindaje electromagnético en aparatos electrónicos respecto a la emisión radiada utilizando materiales absorbente con la formulación de los aditivos de polvos de ferrita Mn-Zn en la faja de frecuencia de GHZ. Este material fue pesquisado y desarrollado en la forma de resinas por el Instituto de Estudios Avanzados (IEAv) en el Departamento de Ciencia y Tecnología Aeroespacial(DCTA), para aplicaciones aeronáuticas y espaciales, visando principalmente los vehículos lanzadores del programa espacial brasileño. Se obtuvieron dos cartas patentes de formulación e innovación; se concluyó, de esa manera, una forma innovadora de blindaje en aparatos electrónicos respecto a la emisión radiada. Se muestra, todavía, la aplicación de la tecnología de realización de ensayos usando la metodología de medidas de reflejo, utilizando cavidades resonantes, en sustitución a la metodología del Arco NRL (Naval Research Laboratory), que es una metodología más eficiente y menos costoso.

Palabras-clave: Absorvedores de microondas. Ferritas Mn-Zn. Blindaje electromagnético. Aplicaciones aeronáuticas.

INTRODUÇÃO

Os trabalhos de pesquisas voltados às necessidades crescentes de obtenção de novos materiais com excelentes propriedades elétricas e eletromagnéticas contribuem cada vez mais para o desenvolvimento de aplicações de materiais absorvedores para uso em blindagens de equipamentos eletrônicos, principalmente quando aplicados no setor aeroespacial. Os maiores desafios, no entanto, foram de caracterizar as propriedades magnéticas destes materiais cerâmicos para a aplicação em sistemas aeroespaciais (MIGLIANO et al, 1999; SAKIOTS, 1953). Os aspectos eletromagnéticos de projeto de um material absorvedor de radiação eletromagnética são focalizados principalmente sobre a sua síntese, sendo que arranjos dos materiais dielétricos e magnéticos proporcionam um perfil de impedância específica para uma determinada onda eletromagnética incidente. Dessa forma, a evolução

da tecnologia de produção desses materiais absorvedores está relacionada diretamente com a exploração de técnicas para obtenção de revestimentos com qualidades apropriadas de absorção da radiação eletromagnética, para uma faixa cada vez mais ampla do espectro. As aplicações desses materiais concentram-se em setores da indústria de telecomunicações e aeronáutica, podendo-se relacionar:

- revestimentos de câmara anecóica para ensaios eletromagnéticos;
- blindagem de ambientes com fontes intensas de RF danosas ao tecido humano;
- antenas de alto desempenho;
- controle de interferência eletromagnética;
- redução de *radar-cross-section* de aeronaves e artefatos;
- blindagens de fornos de microondas, etc.

Em relação aos aspectos de blindagens de equipamentos eletroeletrônicos, optou-se por materiais magnéticos à base de cerâmica, em razão de seu custo e parâmetros magnéticos (permeabilidade, permissividade) mais eficientes. O objetivo da pesquisa visa à fabricação de uma ferrita cerâmica com aditivos Mn-Zn com base em resina epóxi alifática, para a aplicação em blindagens eletromagnéticas de equipamentos em aeronaves e lançadores (MIGLIANO et al, 1999; KIM, CHOI, CHURM, 1999; NAITO 1991). Este trabalho teve também como objetivo o estudo de níveis de absorção, do material fabricado, da radiação na faixa de frequência de GHz, por meio da técnica da cavidade ressonante para realização de ensaios de refletividade eletromagnética.

1 CONCEITOS DE BLINDAGENS

O objetivo da blindagem eletrostática e eletromagnética é a redução ou eliminação da incidência de campos elétricos ou eletromagnéticos nos Equipamentos Eletrônicos Sensíveis (EES), o que ocasiona ruídos, e atrapalha seu funcionamento. Os equipamentos e componentes devem ser blindados em relação à emissão e susceptibilidades tanto radiadas como conduzidas. Analisa-se, assim, o parâmetro de eficiência da blindagem em relação à atuação desses campos, para controle do nível de Interferência Eletromagnética (EMI), sendo, então, mais um parâmetro importante da engenharia moderna para garantir a qualidade do produto. Consideram-se dois tipos de blindagens (SOBRINHO 2007):

1.1 BLINDAGENS ELETROSTÁTICAS

Quando o acoplamento eletrostático consiste em barreiras condutivas como: coberturas de metal, metais condutores, cabos cobertos ou revestimento dos EES (KIM, 1991; CHICAZUMI, 1964).

1.2 BLINDAGENS ELETROMAGNÉTICAS

São normalmente caracterizadas por um material colocado entre duas regiões do espaço com a finalidade de atenuar a radiação eletromagnética entre elas.

2 EFICIÊNCIA DE BLINDAGENS

A eficiência de uma blindagem é a somatória de perdas por absorção, por reflexão e por reflexões múltiplas no interior de um ambiente blindado.

A perda por absorção é a mesma para campos elétricos e magnéticos, sendo que a perda por reflexão e a perda de reflexões múltiplas é dependente do campo magnético incidente (ULABY, 2007; CLAYTON 2006; SOBRINHO, 2007). A eficiência de uma blindagem é, na prática, afetada por vários fatores, como aberturas e juntas em compartimentos ocasionando assim a redução dessa eficiência. Essa redução é maior para campos magnéticos do que para campos elétricos e depende da dimensão linear máxima da abertura ou da frequência do campo em análise. (SAKIOTS, 1953; SOBRINHO 2007). A necessidade de blindagens para EES está presente nas seguintes áreas: tecnologia da informação, equipamentos utilizados em aplicações médicas, telecomunicações e outros equipamentos eletrônicos de uma forma geral.

As aplicações típicas de blindagens abrangem os seguintes aspectos:

- compartimentos (possuem algumas propriedades especiais de blindagem, mas que dependem de fatores como espessura da superfície em contato, etc.);
- aberturas (portas, furos de passagem de cabos, passagens de ventilação, janelas, painéis de acesso), que, em geral, são todos os pontos de fuga EMI em um compartimento; e
- cabos (cabos condutores de sinal, que podem agir como pontos de antenas para irradiar EMI).

Os compartimentos de proteção eletrônicos comerciais são normalmente blindados, pois é uma classe que atende a muitos usuários, dos quais pode-se citar computadores (*mainframes*, computadores pessoais e *workstations*), periféricos (impressoras, *modem*, discos rígidos e equipamentos de redes), equipamentos de telecomunicações (gabinetes de comutação, telefones celulares e PABX), máquinas de fax, copiadoras e sistemas bancários (caixas eletrônicas, equipamentos de leitura óptica). Outros tipos de equipamentos eletrônicos normalmente blindados são equipamentos de aeronaves, equipamentos de aplicações médicas, equipamentos de medição e controle, equipamentos de foto-composição e equipamentos eletrônicos automotivos (padrão MIL - STD 461).

3 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA DE BLINDAGEM

O princípio da blindagem está baseado no uso de materiais condutivos para redução da radiação de EMI, seja pela reflexão e/ou absorção, sendo que, em pesquisas, o uso de materiais absorvedores de microondas à base de aditivos de ferritas cerâmicas é um método para esta

aplicação. O parâmetro usado para medir blindagem denomina-se eficiência de blindagem (SE), sendo sua unidade padrão o decibel (dB). O decibel, em termos de blindagem, é o resultado dos módulos dos valores da razão do campo eletromagnético medido antes e depois da blindagem. Na Figura 1, ilustra-se esta parede de blindagem. Na Tabela 1, apresentam-se os valores quantitativos de SE em função do vazamento da mesma em dB. A Figura 2 ilustra uma Gaiola de Faraday com uma blindagem perfeita, já na Figura 3 está ilustrada uma blindagem deficiente.

Tabela 1: Valores quantitativos de eficiência de blindagem em dB.

Eficiência de Blindagem (dB)	Razão de Atenuação	Vazamento pela Blindagem (%)
20	10:1	10.0
40	100:1	1.0
60	1000:1	0.1
80	10000:1	0.01
100	100000:1	0.001
120	1000000:1	0.0001

Fonte: Sobrinho (2007).

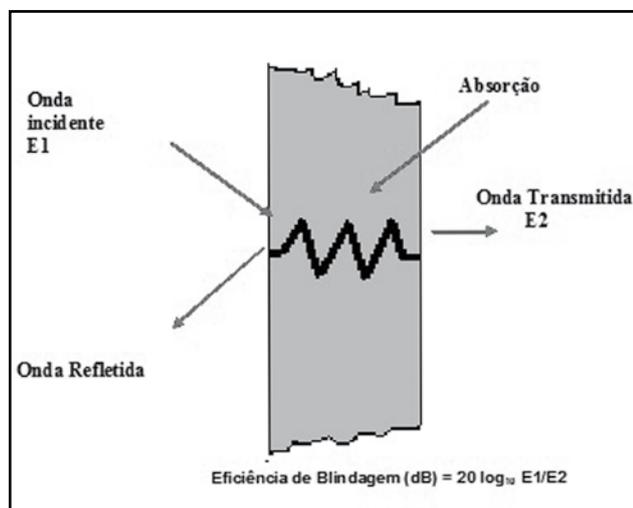


Figura 1: Conceito de Parede de Blindagem (SOBRINHO, 2007).

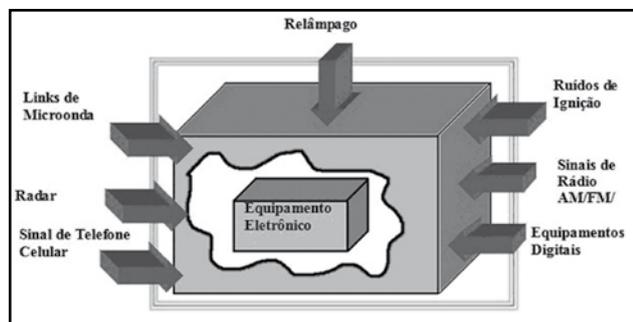


Figura 2: Gaiola de Faraday – Blindagem Perfeita.

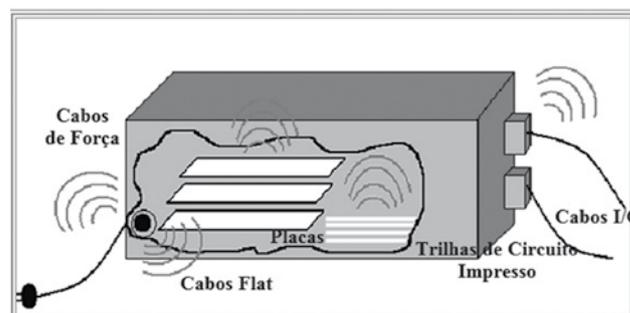


Figura 3: Gaiola de Faraday – Blindagem Deficiente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Pelos aspectos de blindagem citados, optou-se por materiais magnéticos à base de aditivos Mn-Zn, em função de seu custo, parâmetros magnéticos mais eficientes (permeabilidade, permissividade) e maior desempenho em relação a outros materiais pesquisados. A pesquisa tem como objetivo a fabricação dessa ferrita cerâmica para obtenção de materiais absorvedores na faixa de atuação de microondas (GHz) para aplicações em aeronaves e sistemas aeroespaciais (veículos lançadores de satélites e veículos de sondagem) utilizando resina epóxi (BRASIL, 2012). São levadas em conta as características eletromagnéticas de projeto em relação a um material absorvedor de radiação eletromagnética para a frequência de GHz e, principalmente, aspectos relacionados a sua síntese e ao fato de que o arranjo dos materiais dielétricos e magnéticos proporcionam um perfil de impedância especificado para uma determinada onda eletromagnética incidente. A evolução da tecnologia de produção desses materiais absorvedores está relacionada com o estudo de materiais e exploração de técnicas para obtenção de revestimentos com qualidade de absorção da radiação eletromagnética para uma faixa mais ampla do espectro de frequência (BRASIL, 2012).

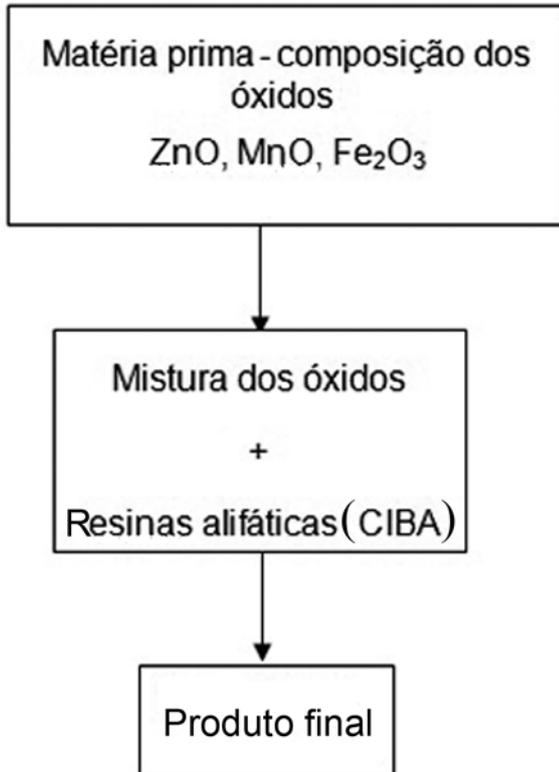
4.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO ADITIVO MN-ZN

O processo de fabricação tem como ênfase o processo da reação do estado sólido (BRASIL 2012, 2013) desenvolvido pelo LSE (Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos). Utiliza-se a composição estequiométrica para elaboração de duas amostras do aditivo Mn-Zn, conforme ilustração na Tabela 2. A fabricação consiste nas seguintes fases: mistura dos óxidos, colocação da mistura em moinho de bolas com álcool ou acetona, durante um período 48 horas de moagem e, a seguir, mistura das resinas, obtendo, então, o produto final de acordo com o processo ilustrado na Figura 4.

Tabela 2: Composição estequiométrica das amostras 1 e 2.

Composição	Amostra 1	Amostra 2
Zn O(%)	25	24
Mn O(%)	25	26
Fe ₂ O ₃ (%)	50	50

Fonte: Departamento de Ciência e Tecnologia da Aeroespacial(2012).

**Figura 4:** Processo de fabricação.

Fonte: Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (2012).

4.2 RESINA EPÓXI

Os revestimentos absorvedores de única camada foram confeccionados com a mistura das amostras de ferritas com as resinas alifáticas da *CIBA Performance Polymers Division* – Brasil. As matrizes amorfas foram obtidas com a mistura de resina flexibilizadora (GY 298), um diluente (DY3601), para controlar a dureza do sistema e garantir sua estabilidade com o tempo, e um agente endurecedor (Hy 840), conforme as formulações apresentadas na Tabela 3, sendo esta a formulação da resina epóxi. Conforme a composição da Tabela 4, foram confeccionados os dois corpos de prova com dimensões 2cmx3cmx4cm.

Tabela 3: Composição do adesivo para amostras 1 e 2 (PI020683-3).

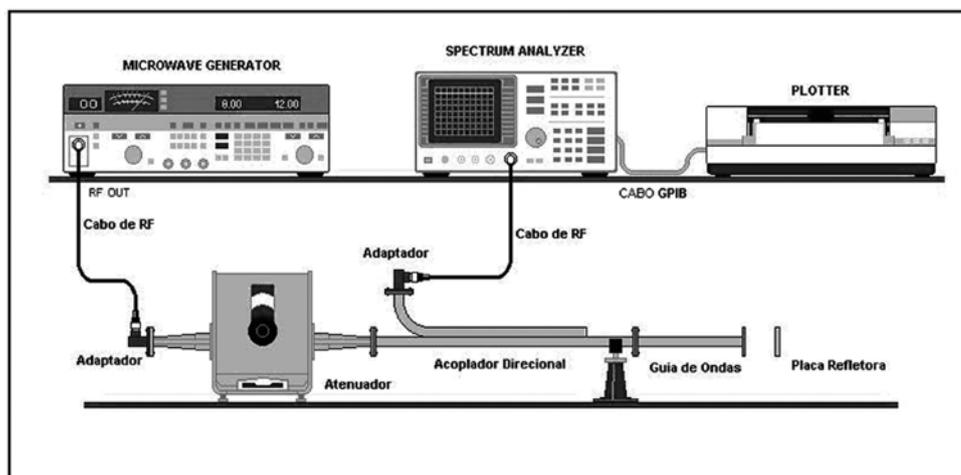
Massa Hy 840 (g)	Massa Dy 360 (g)	Massa Gy 298(g)
20%	33,5 %	46,5%

Tabela 4: Composição do corpo de prova.

Ferrita Mn-Zn	Adesivo
25 %	75%

4.3 ENSAIOS DE MEDIDAS DE REFLETIVIDADES

Na Figura 5, ilustra-se o esquema de instrumentação utilizado neste experimento, sendo que o objetivo é medir a refletividade de uma camada de material aplicada sobre uma superfície metálica, comparando-se com a produzida por uma superfície limpa (referência), feita em guias de ondas retangulares operando no modo TE_{1,0,1}, de acordo com a teoria de guias de ondas (ULABY, 2007; CARVALHO, 2005). Cita-se que o

**Figura 5:** Esquema da instrumentação utilizando guias de ondas.

principal dispositivo da montagem é o acoplador direcional de múltiplas fendas (faixa larga), que tem a propriedade de separar os sinais incidentes (sentido gerador-carga) do sinal refletido. Tendo esse dispositivo a propriedade de acoplar energia para o guia secundário apenas na direção da onda incidente, com uma directividade mínima de 40 dB, é possível a realização de medidas de refletividade de amostras no interior do guia de ondas. O erro resultante da directividade finita do acoplador é pequeno, podendo ser desprezado. O gerador usado deve ter a função de varredura em frequência, abrangendo a faixa desejada com um nivelamento interno, de forma que o nível do sinal não se altere com a frequência e com o tempo. Ao trocar uma amostra por outra, o nível de sinal deverá ser atenuado para evitar a exposição à radiação de microondas por parte dos operadores. Após a colocação de nova amostra no guia e da placa refletora, o nível de operação deve ser restabelecido.

O método empregado na medição de absorção de microonda por parte do material é o da reflectometria em guias de ondas usando acoplamento direcional, o qual permite a varredura em frequência dentro da faixa recomendada pelo fabricante. O guia de ondas é conveniente, já que se necessita apenas de amostras com as dimensões do guia, o que permite grande economia de material. Na técnica de medida de radiação, a amostra é inserida no guia de onda, conforme ilustrado na Figura 6.

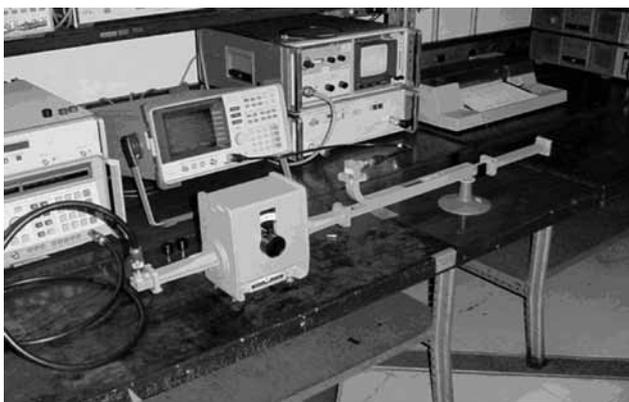


Figura 6: Instrumentação para ensaio realizado no DCTA-IAE.

Faz-se então o experimento usando o método da cavidade ressonante para duas amostras. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Radio Frequência do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme ilustrado na Figura 7, conclui-se que as características de absorção seletiva de radiação

eletromagnética nos corpos de prova das amostras 1 e 2 confeccionadas à base de ferrita Mn-Zn têm nível de absorção médio, entre 0 e 10 dB, na faixa de frequência de 0 – 20 GHz.

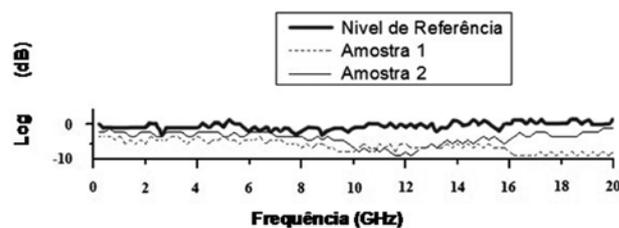


Figura 7: Curvas de absorção obtidas relativas às amostras 1 e 2 contendo aditivo de Mn-Zn.

Observa-se, então, que os valores obtidos são equivalentes a 98% de absorção da onda incidente na frequência de 12 GHz. Porém, este valor de absorção pode ainda ser otimizado em função da pesquisa dos novos valores de porcentagem de volume do aditivo cerâmico de Mn-Zn na composição do corpo de prova. Dessa forma, estabelece-se esse parâmetro para otimizar a formulação da composição com o objetivo de aumentar a eficiência de absorção dos revestimentos utilizados como blindagem eletromagnética em aplicações aeroespaciais à base de ferrita Mn-Zn. Nota-se, também, que, na faixa de frequência entre 8 a 10 GHz, o nível de absorção é baixo e o fator de vazamento é alto. Com o aumento da faixa de frequência, a razão de atenuação vai aumentando e o vazamento vai diminuindo, até chegar a um valor ideal em torno de 12 GHz, sendo o valor estipulado para a faixa de operação desejada. Este é o fenômeno que ocorre nas duas amostras com composições estequiométricas diferenciadas em relação às frações de porcentagem. Em 12 GHz, dá-se a faixa ideal para aplicação nas blindagens, nas frequências em torno de 8-20 GHz, com vazamento tolerável para níveis de blindagens desejadas no âmbito de atuação aeroespacial. Nota-se que as duas amostras tiveram a mesma composição de fabricação, com pequenas variações na estequiometria, e passaram pelo mesmo tipo de *setup* de ensaios. Manteve-se a repetibilidade de resultados, sendo que o nível de absorção, tanto para amostra 1 quanto para a amostra 2, praticamente foi o mesmo na frequência de 12 GHz, que é o objetivo desejado na faixa de frequência de operação de radar para sistemas aeroespaciais. Este tipo de composição com base em resinas alifáticas é mais eficiente do que os sistemas à base de polímeros, para o caso de eliminação de ruídos em termos de blindagens, sendo esta a justificativa para o uso da ferrita e da base de resina epóxi em blindagens de equipamentos

e componentes na faixa de operação da banda-X. Em relação ao método de medidas de refletividade, o uso da cavidade ressonante mostrou um grau de eficiência igual ou melhor do que a técnica do arco NRL (FREITAS, 2002), e se trata de uma nova técnica para medição da absorção de radiação eletromagnética.

CONCLUSÕES

Conclui-se que a formulação proposta dos aditivos Mn-Zn pode ser utilizada como blindagem eletromagnética, na faixa de frequência de GHz, de equipamentos eletrônicos aplicados no setor aeroespacial. O método de medidas de refletividade

através das cavidades ressonantes é uma nova opção de medidas, que também é eficiente em relação ao arco NRL e, de certa forma, de menor custo, uma vez que a instrumentação e o corpo de prova também são menores, e tem-se grande eficiência, fatos observados nos ensaios das duas amostras. A formulação da composição é inovadora e deu origem às cartas de patentes citadas, nas quais comprova-se a eficiência de absorção dos aditivos e a eficiência do método da cavidade ressonante para os ensaios de refletividade magnética. Portanto, estas formulações e métodos deverão ser aplicados de imediato nos projetos de blindagens de circuitos eletrônicos no programa de lançadores de satélites que é prioridade no setor aeroespacial do Comando da Aeronáutica.

REFERÊNCIAS

CARVALHO, M. I. B. **Guias de Onda**. Portugal: Universidade do Porto, 2005.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. **Composição e Fabricação da Ferrita MnO-MgO-Fe₂O₃**. São José dos Campos-SP, 2012. (BR-PI020683-3,09 maio 2002, RPI 2160 Agosto 2012.)

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. **Processo de Fabricação da Manta Absorvedora de Microondas com Resina Epóxi**, 2013. (BR -PI-0203563-4 B1, 09 maio 2004, RPI 2192 Janeiro, 2013.)

CHIKAZUMI, S. **Physics of magnetism**. New York: John Wiley & Sons, 1964.

CLAYTON, R. P. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. New York: John Wiley & Sons, 1992. 763p.

FREITAS, C. A. R.; DE MIGLIANO, A. C. C., MELO, F.C.L. Características de Absorção da Radiação Eletromagnética em Revestimentos Planos à Base de Ferritas de Mg-Mn. **INATEL-Telecomunicações**, v. 1, dez, 2002.

KIM, J. M. et al. Complex permeability and permittivity and microwave absorption of ferrite-rubber composite in X-band frequencies. **IEEE Transactions on Magnetic**, v. 27, issue 6, part. 2, p. 5462-5464, 1991.

MIGLIANO, A. C. C. et al. Caracterização experimental de tintas absorvedoras de radiação eletromagnética, In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TINTAS, 6., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Abrafati, 1999. p. 453-460. v. 2.

NAITO, Y.; SUETAKE, K. Application of ferrite to electromagnetic wave absorbers its characteristics. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 19, issue 1, p. 65-72, 1971.

SAKIOTIS, N.G.; CHAIT, H.N. Ferrites at microwaves. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, v. 41, issue 1, p. 87-93, 1953.

SOBRINHO, J. P. F. **Interferência eletromagnética nos centros urbanos**. São Paulo: Erica, 2007.

ULABY, F. T. **Eletromagnetismo para engenheiros**. Tradução: José Lucimar do Nascimento. Porto Alegre: Bookman, 2007.