

# A UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA A PREDIÇÃO DE COMPORTAMENTO DE MARE MAGNÉTICOS

Adriano Luiz DE PAULA<sup>1,2</sup>, Adriana Medeiros da GAMA<sup>1,3</sup>, Mirabel Cerqueira REZENDE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial – CTA / Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE / Divisão de Materiais – AMR.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais-INPE / Laboratório de Computação e Matemática Aplicada – LAC.

<sup>3</sup> Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial – CTA / Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

Joaquim J. BARROSO<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE / Laboratório Associado de Plasma

**Resumo** — Atualmente, a simulação computacional adquire importância cada vez maior na área de materiais, uma vez que é possível prever características e comportamento dos mesmos, em diferentes setores da engenharia, por exemplo, mecânica, eletrônica, elétrica. Este trabalho, em particular, faz uso de técnicas computacionais na predição e estudo do comportamento eletromagnético de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE). Este trabalho visa obter por simulação computacional os parâmetros S (S11 e S21) de um MARE com diferentes espessuras, pelo uso da técnica de linha de transmissão em guia de ondas retangular, na faixa de frequências da banda X, utilizando o software *Microwave Studio* (MS) da CST (*Computer Simulation Technology*).

Os resultados obtidos na simulação computacional apresentam a tendência da interação eletromagnética no material medido. Por meio das simulações realizadas foi possível, variando-se a espessura, obter a frequência de ressonância do material com o maior valor de atenuação. A correlação desses resultados com os dados experimentais mostra a validade das simulações realizadas.

**Palavras-chaves** — Caracterização Eletromagnética, Parâmetros S, Simulação Eletromagnética.

## I. INTRODUÇÃO

O conhecimento da permissividade e permeabilidade complexas de materiais é de grande interesse em aplicações científicas e industriais. A medição de  $\epsilon_r$  e  $\mu_r$  em frequências de microondas encontra aplicação direta, por exemplo, no estudo de efeitos biológicos da radiação eletromagnética, em sinterização de cerâmicas, em soldagem de plásticos, em setores da indústria aeroespacial, de microeletrônica, de telecomunicação, de microondas e, em particular, na pesquisa de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE). Neste caso, o conhecimento desses parâmetros permite prever as características eletromagnéticas dos materiais via simulações computacionais, de modo a otimizar os seus desenvolvimento e processamento, bem como a sua utilização para fins específicos [1,2].

A simulação eletromagnética adquire relevância à medida que os resultados simulados confirmam os dados experimentais. Uma forte associação entre simulação e experimento contribui para aumentar a confiabilidade do aplicativo desenvolvido para a finalidade específica [3]. Uma das finalidades da simulação computacional é reconstruir as medidas experimentais, com o objetivo de entender o comportamento e avaliar os parâmetros das medidas, obter novos parâmetros em situações diferentes, porém consistentes com a análise experimental [3], além de minimizar os custos.

Em situações em que uma análise modal completa torna-se muito complexa e de difícil solução, utilizam-se métodos numéricos, tais como Métodos de Elementos Finitos (FEM) e Diferença Finita (FDM) e, mais recentemente, está sendo popularizado no meio científico, um software para simulação com características próprias para análises e projetos eletromagnéticos, em uma banda de frequências específica, o CST (*Computer Simulation Technology*) [3].

Os métodos aproximados buscam uma aproximação do que seria o valor exato, desta forma é inerente toda predição trabalhar com aproximação, erro e desvio.

## II MATERIAIS E MÉTODOS

O MS-CST utiliza para simulação o método PBA (*Perfect Boundary Approximation*) e uma extensão do TST (*Thin Sheet Technique*), que aumenta a precisão da simulação em comparação com simuladores convencionais. O software utiliza métodos de trabalho bem equivalentes, em todos os domínios. O MS-CST contém quatro diferentes técnicas de simulação; *transient solver*, *frequency domain solver*, *eigenmode solver*, *modal analysis solver*. Essas técnicas são utilizadas conforme as aplicações específicas [3].

Este trabalho utiliza a ferramenta computacional MS-CST para simulação, análise e desenvolvimento de MARE. Para este trabalho foi montado o *setup* apresentado na Figura 1, de acordo com [3]. Este estudo tem como objetivo verificar a convergência entre resultados obtidos experimentalmente e pela simulação computacional dos parâmetros S (S11 e S21) e S11 com placa metálica de um material magnético.

Neste estudo, para a calibração, foi utilizado o poli(difluoroetileno) na espessura de 5,75 mm; avaliado pelo método de caracterização eletromagnética de linha de transmissão e técnica de guia de ondas retangular. Para isto, foram utilizados o acessório WR-90 (Banda X – 8,2 a 12,4 GHz) e um analisador de redes vetorial 8510C, ambos da Agilent Technologies [4].

Adriano Luiz de Paula, [alpaula@iae.cta.br](mailto:alpaula@iae.cta.br), Tel +55-12-3947-6443, Adriana Medeiros da Gama, [adriana.gama@iae.cta.br](mailto:adriana.gama@iae.cta.br), Tel +55-12-3947-6473, Fax +55-12-3947-6405, Mirabel Cerqueira Rezende, [mirabel@iae.cta.br](mailto:mirabel@iae.cta.br), Tel +55-12-3947-6420, Fax +55-12-3947-6405; Joaquim J. Barroso, [barroso@plasma.inpe.br](mailto:barroso@plasma.inpe.br), Tel +55-12- 3645-6696, Este trabalho foi financiado pelo FINEP, por meio do Projeto No. 1757/03 e CNPq (Processo: 301583/06-3)

Para a calibração do analisador de redes 8510C, os valores estabelecidos como padrões devem estar armazenados em sua memória, para que ao executar os procedimentos de calibração, os valores medidos e os de referência sejam comparados, de forma a se obter precisão e exatidão das medidas efetuadas [4,5]. Neste estudo foram utilizados conjuntos de calibração de acordo com a banda de frequências. A Figura 2 apresenta o conjunto de calibração para a banda X [6,9,10].

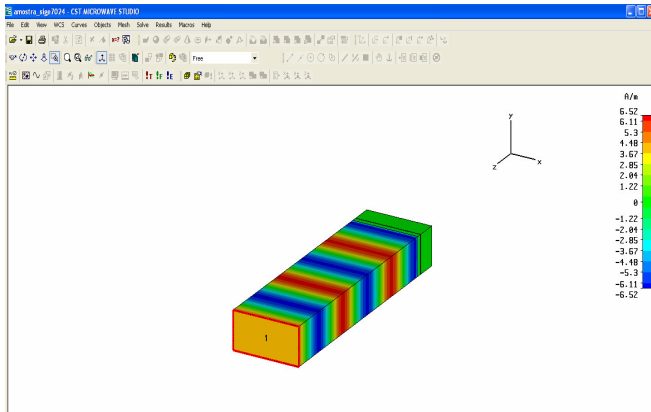


Fig. 1. Setup montado no MS-CST, utilizando a técnica de linha de transmissão em guia de ondas para a banda X [3].



Fig. 2. Conjunto de calibração em guia de ondas para a banda X [3].

Os valores de permissividade e permeabilidade complexas do ar atmosférico e do poli(difluoroetileno), comercialmente conhecido como Teflon®, são conhecidos por se tratarem de materiais intensamente medidos desde as primeiras publicações [7,8]. Por este motivo, esses materiais foram escolhidos como referência.

Para as medidas dos parâmetros S ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  e  $S_{22}$ ), é adotada a configuração de medida apresentada na Figura 3, onde o sistema é fechado com o porta-amostra entre o adaptador da porta 1 e a extremidade do trecho de guia de ondas da porta 2, mantendo como plano de referência o adaptador da porta 1 [2,5].



Fig. 3. Configuração para medidas dos parâmetros S [2,5].

Depois de efetuada a calibração das portas 1 e 2 foi realizada a medição dos Parâmetros S e, em seguida, a determinação do parâmetro  $S_{11}$  com uma placa metálica acoplada ao porta amostra. Conforme diagrama da Figura 3.

Em seguida, foi feita medição de um material magnético para se obter os valores da permissividade e permeabilidade complexas.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Assim, foram obtidos por cálculo os respectivos módulos e médias da permissividade e permeabilidade da amostra com características magnéticas, conforme os valores da Figura 4.

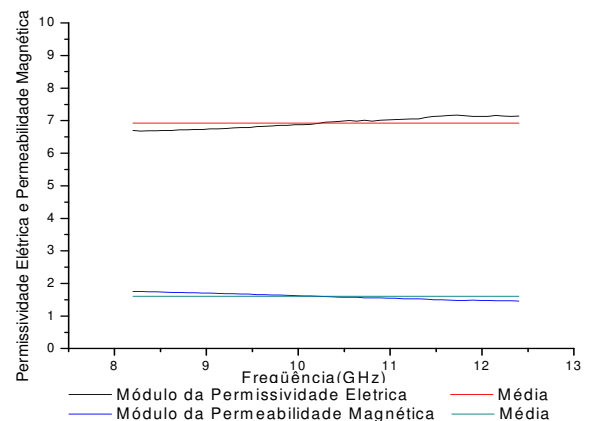


Fig. 4. Módulo da Permissividade Elétrica e Permeabilidade Magnética e suas respectivas Médias

As curvas dos parâmetros  $S_{21}$  na Figura 5 se sobrepõem no patamar de 0 dB, observados tanto na curva simulada quanto na experimental. Os valores experimentais de  $S_{11}$  ( $S_{11E}$ ) apresentam-se entre -10 e -5 dB e os valores simulados de  $S_{11}$ , limitam-se ao intervalo de -12 a -5 dB.

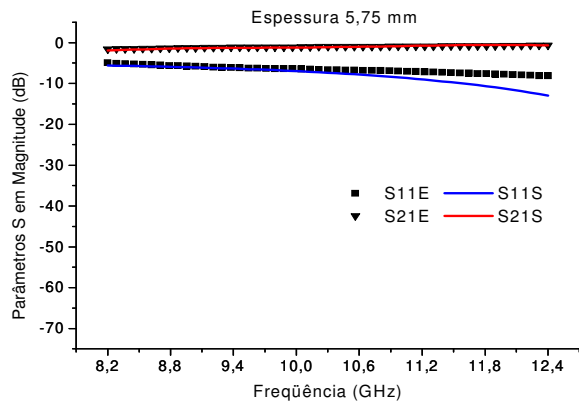


Fig. 5. Medidas experimentais e simuladas dos parâmetros S11 e S21 do poli(difluoroetileno), com 5,75 mm de espessura.

Embora os valores simulados não reproduzam exatamente valores experimentais, a Figuras 5 mostra a tendência da interação da onda eletromagnética com o material.

Nas curvas simuladas dos parâmetros S11 e S21, sem placa metálica, Figuras 6 e 7, é verificado que ocorre oscilação em função da frequência e da espessura do material analisado. A presença de oscilação para o parâmetro S11 ocorre no intervalo de -4,65dB a -6,15 dB e para S21 no intervalo de -4,69dB a -6,70 dB.

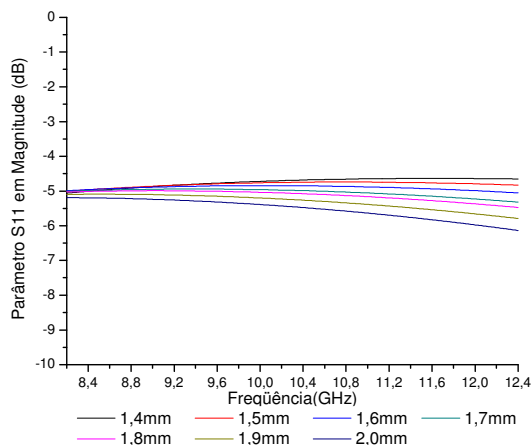


Fig.6. Medidas simuladas dos parâmetros S11 do material magnético..

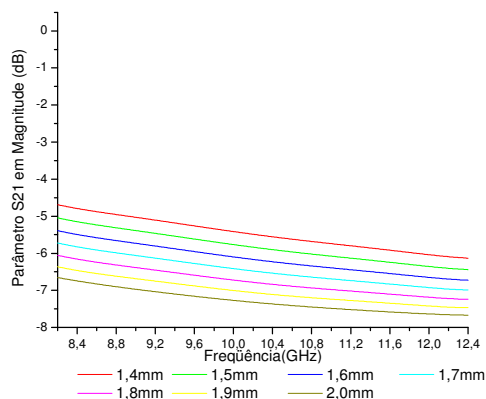


Fig.7. Medidas simuladas dos parâmetros S21 do material magnético

Embora os valores simulados não foram confrontados com os valores experimentais, as medidas simuladas dos

parâmetros S em magnitude das Figuras 6 e 7 indicam a tendência da interação da onda eletromagnética com o material, e os resultados obtidos, estão coerentes com os esperados para material magnético conforme publicado em literatura [2].

As curvas da Figura 8 correspondem às medidas simuladas para o material magnético, obtidas a partir dos parâmetros S11 acoplado a uma placa metálica como mostra a Figura 9.

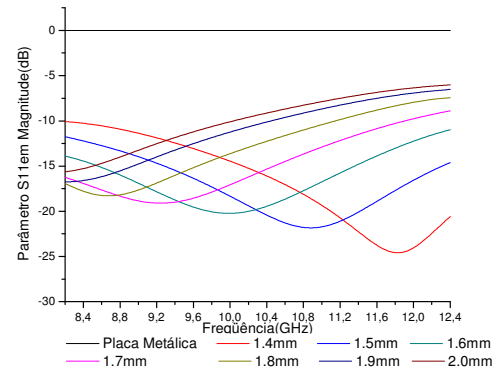


Fig.8. Medidas simuladas dos parâmetros S11 com placa metálica

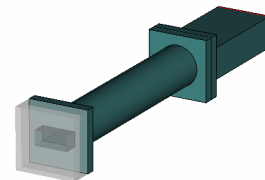


Fig. 9. Setup de simulação de medida do parâmetro S11 com placa metálica

Na simulação foi possível verificar que o material tem picos de ressonância em diferentes espessuras simuladas. O efeito de ressonância ocorre quando a onda refletida da face frontal sofre cancelamento de fase com a onda refletida da face posterior do corpo-de-prova, ou seja, quando a espessura da amostra dielétrica é um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda no interior do material.

Observa-se, também, que o material apresenta efeito de ressonância nas espessuras de 2,0 mm a 1,4 mm, na faixa de frequências da banda X, ou seja, de 8,2 a 12,4 GHz, com atenuação superior a -10 dB.

#### IV. CONCLUSÃO

Os valores obtidos na simulação computacional mostram a tendência da interação eletromagnética com o material magnético caracterizado. Este comportamento é observado nas medidas simuladas em todas as espessuras de 2,0 mm a 1,4 mm.

Foi verificado no material simulado o deslocamento do efeito de ressonância em função da frequência e o aumento da atenuação em função da espessura. O efeito de ressonância ocorre devido ao cancelamento de fases entre as faces do material analisado.

A partir da simulação computacional, utilizando o software MS CST, e do sistema de simulação apresentado neste trabalho, foi possível, variando-se a espessura, obter a

frequência de ressonância do material com o maior índice de atenuação.

## V. REFERÊNCIAS

- [1] NOHARA, E. L., “**Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnéticos**”. 2003. 198f. Tese (Doutorado em Ciência) – Curso Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003a.
- [2] PEREIRA, J. J. **Caracterização Eletromagnética de Materiais Absorvedores de Microondas via Medidas de Permissividade e Permeabilidade Complexas na Banda X**. 2007. 201f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Curso de Engenharia Mecânica, área Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007.
- [3] RF Design and Analysis C.S.T. **Microwave StudioGetting Started** p.3-8.
- [4] AGILENT TECHNOLOGIES **Agilent 8510XF Vector Network Analyzer Single-Connection, Single-Sweep Systems**. Application Note Product Overview - 5965-9888E. USA. 2000.
- [5] AGILENT TECHNOLOGIES. **Specifying calibration standards for the Agilent 8510 Network Analyzer**. Application Note 8510-5B 5659-4352. USA. 2006.
- [6] AGILENT TECHNOLOGIES. **11644A X, P and K Waveguide Calibration Kits**. User’s and service guide, 83 p., 2002.
- [7] HIPPEL, A. R. V. **Dielectric Materials and Applications**. USA: Massachusetts Institute of Technology, John Wiley, New York, 1954.
- [8] NICOLSON, A. M.; ROSS, G. F., “**Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques**”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, no. 4, p.377-382, Nov. 1970.
- [9] VICENTE, A. J. **Guias de Onda Retangulares Preenchidos por Múltiplas Camadas de Dielétricos para Filtragem em Microondas de 10 à 15 GHz**. 2004. 124f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- [10] BUEL, K. **Development of Engineered Magnetic Materials for Antenna Applications**. 2005. 198f. Dissertation (Doctor of Philosophy) – Course Electrical Engineering – The University of Michigan, Michigan, 2005.
- [11] SIMÕES, R. **Materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8 a 12 GHz**. 2005. 88f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Curso Engenharia Mecânica, área Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2005.