

ESTUDO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA PERMISSIVIDADE E PERMEABILIDADE DE MATERIAIS COM SUPORTE DE UM MÉTODO DE CÁLCULO

Pedro J. Castro^{1*}, Joaquim J. Barroso², Miguel A. Amaral Jr³, Mauricio R. Baldan³

¹Laboratório Associado de Plasma

³Laboratório Associado de Sensores e Materiais

^{1,3}Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 12227-010

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 12228-900

São José dos Campos, SP, Brasil

*E-mail: pedro.castro@inpe.br

RESUMO

No presente estudo são medidas a permissividade e a permeabilidade de diferentes materiais: teflon, gesso e macor. A técnica adotada consiste na transmissão/reflexão de ondas eletromagnéticas para medir os coeficientes de transmissão e reflexão em um trecho de guia de onda preenchido com amostra do material a ser investigado. O guia de onda mencionado, de seção reta de dimensões 22,86 mm x 10,16, opera na faixa de frequência de 8,2 a 12,4 GHz e desempenha a função de porta-amostra. Por ser um material cujas propriedades são bem conhecidas, foi escolhido como referência o politetrafluoretileno (teflon). A partir dos coeficientes medidos, usa-se o algoritmo de Nicolson-Ross-Weir (NRW) para determinar os valores da permissividade e permeabilidade complexas dos materiais. Os resultados experimentais e analíticos mostraram uma boa concordância, o que confirma a aplicação da metodologia empregada para a caracterização dos materiais para a faixa de frequência de operação e reproduziram valores da literatura.

Palavras-chave: permissividade elétrica, permeabilidade magnética, parâmetros de espalhamento, algoritmo de Nicolson-Ross-Weir.

INTRODUÇÃO

A aplicação de materiais em diferentes áreas como aeroespacial, engenharia de micro-ondas, microeletrônica, indústria de telecomunicações, efeitos biológicos

da radiação eletromagnética, entre outras, requer o conhecimento dos parâmetros de permissividade elétrica e permeabilidade magnética ⁽¹⁾. Além disso, a informação sobre essas grandezas permite prever o comportamento dos materiais por meio de simulações computacionais, no afã de reproduzir os resultados experimentais. Um exemplo ilustrativo refere-se ao gesso, proveniente do mineral gipsita, que na dependência do valor de sua permissividade (também chamada de constante dielétrica), pode ser aplicado em diferentes setores como engenharia civil, odontologia, medicina, agricultura, artes plásticas e ainda é um dos componentes na fabricação do papel, além de ser um isolante térmico e contribuir no melhoramento acústico de ambiente ⁽²⁾.

Em geral, a escolha do método de medida depende do tipo de material e de seu estado físico. Para materiais sólidos e dielétricos, tem sido bastante difundida na literatura a técnica de reflexão/transmissão de ondas eletromagnéticas, que requer o conhecimento dos parâmetros de espalhamento, ou seja, as medições dos coeficientes de transmissão e reflexão numa secção de guia de onda ou linha de transmissão coaxial preenchida com amostra do material a ser investigado ⁽¹⁻⁴⁾.

No caso de nosso estudo é usado o guia de onda da banda X, de dimensões 22,86 mm x 10,16 mm, que opera na faixa de frequências de 8,2 a 12,4 GHz. Pela facilidade de preparação das amostras, corpos de prova retangulares são confeccionados de modo a serem devidamente colocados no trecho do guia que desempenha a função de porta-amostra.

Por ser um material cujas propriedades eletromagnéticas são bem conhecidas, foi escolhido como referência o politetrafluoretileno, comercialmente conhecido como teflon. E como o gesso (sulfato de cálcio dihidratado) é um material de fácil disponibilidade, o adotamos como um representativo cerâmico. Outro material a ser investigado trata-se do macor, material isolante largamente usado em eletrônica. A partir dos parâmetros de espalhamento medidos, usa-se o algoritmo de Nicolson-Ross-Weir (NRW) ^(5,6) para determinar os valores da permissividade e permeabilidade complexas dos materiais, na mencionada faixa de frequências de micro-ondas.

Em seguida, para confirmar os valores das grandezas determinadas, faz-se o problema inverso: de posse dos valores da permissividade e permeabilidade foram obtidos analiticamente os coeficientes de transmissão e reflexão.

Embora se reconheça que o processo aqui apresentado não possua uma grande precisão em toda a faixa de frequências, em comparação com aquele que em-

prega um conjunto de calibração especial junto com um aplicativo computacional ⁽⁹⁾, entretanto, tem custo bem menos elevado num fator de 50 a 100 vezes. Em suma, o presente estudo ajuda a contribuir para o estabelecimento e validação experimental com simulação computacional no processo de determinação de parâmetros intrínsecos de materiais de uma forma bastante simples, sem recursos experimentais e computacionais sofisticados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Considerações Gerais

O esquema metódico para as medições dos parâmetros de espalhamento - coeficientes de reflexão (S_{11}) e transmissão (S_{21}) de uma amostra sólida inserida no trecho de guia de onda retangular, que tem a função de porta-amostra, é apresentado na Fig. 1. Para isso as superfícies do material a ser investigado devem ser bem definidas de modo que aqueles parâmetros podem ser determinados com precisão, base para uma determinação confiável da permissividade e permeabilidade. De acordo com a Fig. 1, no trecho de guia de onda a amostra de comprimento L está ladeada por dois intervalos L_1 e L_2 que podem estar vazios. Na análise, o material é considerado isotrópico, homogêneo e plano.

Ainda referente à Fig. 1, da onda eletromagnética incidente no corpo-de-prova representada pelo vetor campo elétrico E_i , uma parte da onda é refletida, vetor E_r e outra é transmitida, vetor E_t . O coeficiente de reflexão S_{11} está relacionado com a onda que parte da porta 1 e é coletada na própria porta 1, enquanto o coeficiente de transmissão S_{21} relaciona a onda que parte da porta 1 e é coletada na porta 2. A largura do trecho de guia de onda foi delimitada em torno da quarta parte do comprimento de onda guiado por quatro ($\lambda_g/4$) da frequência média (considerado o valor inteiro de 10 GHz) da faixa (8,2 -12,4), que corresponde ao valor de 9,92 mm, arredondado para 10 mm. O comprimento de onda guiado (λ_g) é calculado conforme a equação:

$$\lambda_g = \frac{c}{f} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r - \left(\frac{fc}{f}\right)^2}} \quad (A)$$

onde c é a velocidade da luz; f , a frequência de referência (10 GHz); $f_c = 6,557$, a frequência de corte; ϵ_r e μ_r , a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética relativas do material, respectivamente.

O comprimento de $\lambda_g/4$ é significativo, pois corresponde ao valor do trecho de guia de onda em circuito aberto; fechando o guia com uma placa metálica, temos um curto-circuito. Os segmentos de circuito aberto e curto-circuito compõem o conjunto de calibração - elementos necessários no processo de calibragem do sistema de medidas.

A partir das medições dos parâmetros de espalhamento – S_{11} e S_{21} , o método de Nicolson-Ross-Weir (NRW) é usado para determinar os valores da permissividade e permeabilidade complexas dos materiais a serem investigados. Uma vez obtidos os valores de permissividade (ϵ) e da permeabilidade (μ), faz-se o problema inverso: readquirem-se os valores de S_{11} e S_{21} e os resultados experimentais e analíticos são confrontados. O processo em vigor encontra-se esquematizado na Fig. 2.

Arranjo Experimental e Calibração

A montagem experimental completa é mostrada na Fig. 3, onde o trecho de guia de onda é simetricamente conectado em ambas as extremidades a idênticos adaptadores guia de onda/cabo coaxial, que são usados para irradiar e detectar as ondas refletidas e transmitidas do material. O Analisador de Rede Vetorial Agilent N5230C é usado para medir os coeficientes de reflexão e transmissão do material em teste e coletar os dados experimentais. A Fig. 4 retrata o trecho de guia de onda que serve como porta-amostra, que por sua vez corresponde a um circuito aberto; ao seu lado vê-se uma placa metálica que parafusada ao guia vazio funciona como um curto-circuito, ambos para calibração do sistema de medidas (Fig. 5). Basicamente o conjunto de calibração é composto do guia vazio com extremidades abertas e a placa metálica (tampa). Com a calibração do sistema de medidas, os valores estabelecidos de curto-circuito e em aberto são armazenados na memória do analisador de rede, para que esses valores de referência e aqueles efetivamente medidos sejam comparados de modo a haver uma precisão e confiabilidade das medições executadas. A calibração também estabelece os planos de referências das medições que constituem a porta 1 e a porta 2 (Figs. 1 e 3).

O corpo de prova deve ser usinado ou preparado cuidadosamente para preencher parcial ou completamente no sentido transversal o porta-amostra de modo a evitar os efeitos de fenda (“gap”) que podem causar oscilações espúrias e indesejáveis, quando das medições dos parâmetros S (S_{11} e S_{21}). Além disso, o corpo de prova deve possuir faces planas, retas e sem rugosidades.

A fonte do analisador gera o sinal que irradia sobre o material sob teste. Os parâmetros S_{11} e S_{21} detectados no receptor podem ser visto no monitor com suas partes em módulo e fase. Após as medições dos parâmetros S , a permissividade e a permeabilidade são calculadas e traçadas em toda a faixa de banda X de frequências conforme o procedimento descrito na Fig. 2.

O comprimento do trecho de guia de onda mede 10 mm, portanto, se a amostra ocupar todo o seu espaço teremos $L = 10$ mm e $L_1 = L_2 = 0$. Às vezes é conveniente que a amostra tenha um comprimento menor que 10 mm, pelo fato de haver o efeito de ressonância quando a onda refletida da face frontal sofre um cancelamento de fase com a onda refletida da face posterior da amostra, ou seja, quando a espessura da amostra é um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda ($\lambda/2$)⁽⁷⁾.

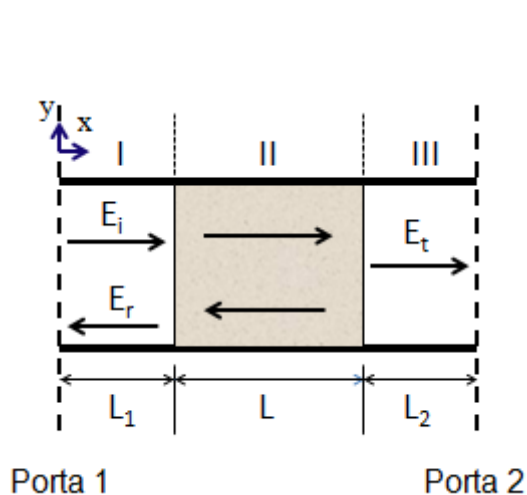


Figura 1. Esquema da estrutura do trecho de guia de onda preenchido com material a ser investigado junto com as ondas incidente, refletida e transmitida.

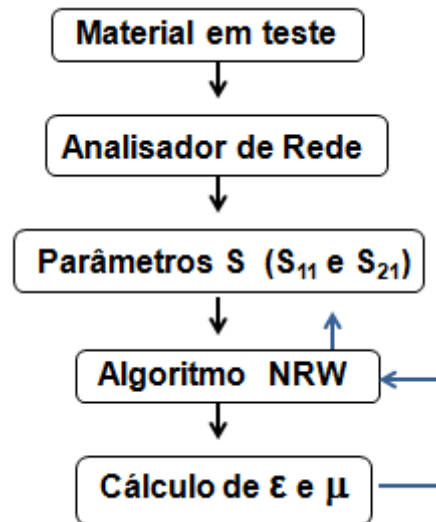


Figura 2. Diagrama em bloco do processo de avaliação da permissividade e permeabilidade de materiais.

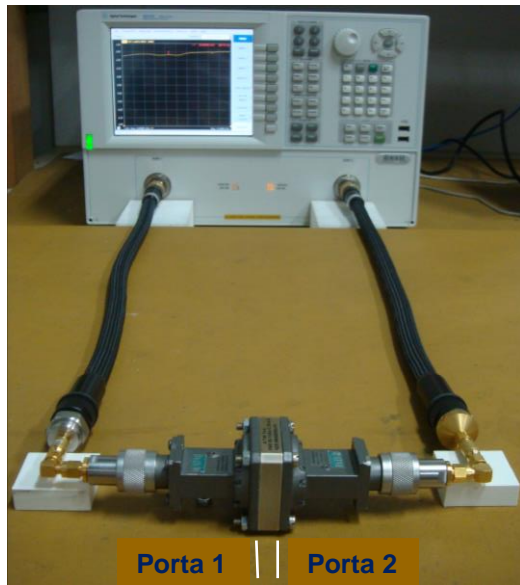


Figura 3. Montagem experimental completa para medição dos parâmetros de espalhamento S_{11} e S_{21} .



(a)



(b)

Figura 4. (a) Vista parcial unificada; (b) componentes separados: o conjunto de calibração (trecho de guia e placa metálica) e os adaptadores guia/cabo coaxial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais de permissividade (ϵ) e permeabilidade (μ) em valores reais para a amostra de teflon com 10 mm de espessura são apresentados na Fig. 5. Percebe-se que até 10,5 GHz a permissividade real oscila em torno do valor 2,03 e em seguida ocorre um modo eletromagnético aprisionado em torno de 10,5 GHz (pela presença de fenda na amostra) e de uma ressonância em 11,5 GHz, fenômeno já explicado anteriormente. No registro da Fig. 6, os valores medidos dos parâmetros de espalhamento de partida em módulo e fase são comparados com aqueles calculados analiticamente tomando os valores complexos de $\epsilon = 2,03 - j1,00$ e $\mu = 1,00 + j1,00$ (valores tabelados): uma boa aproximação de valores é obtida, tanto em módulo como em fase. Embora os valores calculados de S_{11} e S_{21} reproduzam com boa concordância os valores experimentais, porém, o mesmo não se verificou para ϵ e μ . Na tentativa de eliminar o problema da ressonância, foi preparada uma nova amostra, agora com 5 mm de espessura; neste caso para o cálculo no modelo NRW, considera-se $L_1 = 5$ mm e $L_2 = 0$ no esquema da Fig. 1.

Desta vez o efeito de ressonância não foi observado e todos os valores reais e imaginários de ϵ e μ são praticamente constantes em toda a faixa de frequência

considerada, conforme demonstra a Fig. 7, e concordante com a literatura referente aos valores e comportamento.

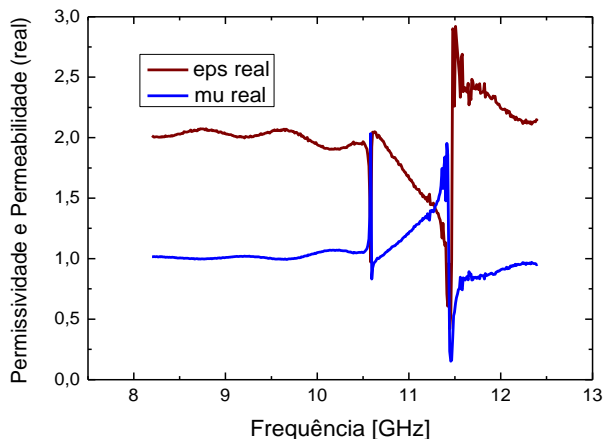


Figura 5. Partes reais da permissividade e permeabilidade medidas para a amostra de teflon com 10 mm de espessura.

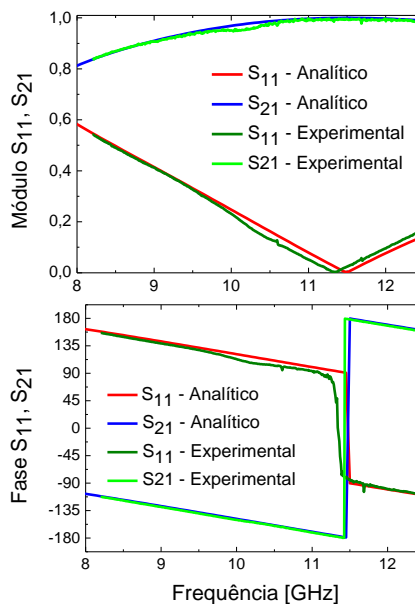


Figura 6. Comparação dos valores medidos de S_{11} e S_{22} e os calculados pelo modelo NRW para a amostra de teflon 10 mm.

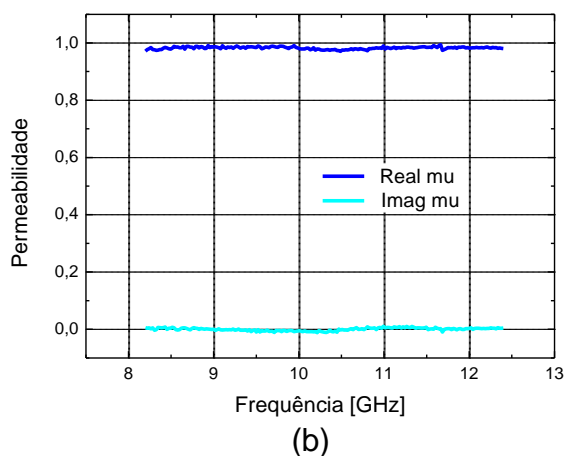
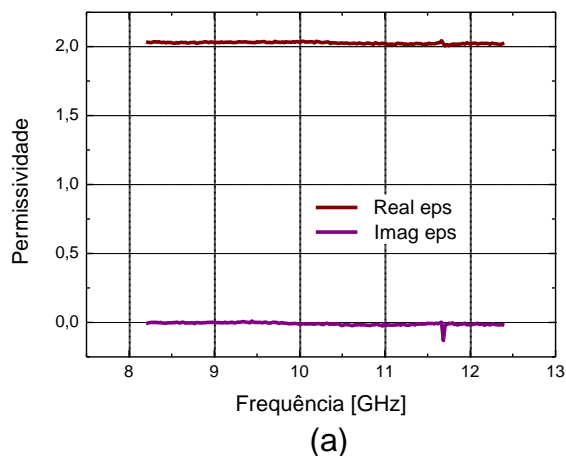


Figura 7. Valores medidos das componentes reais e imaginárias da (a) permissividade (eps) e (b) permeabilidade (mu) em função da frequência para o teflon de 5 mm de espessura.

Depois de um material do tipo polímero, analisaremos um representativo cerâmico – o gesso, na forma de sulfato de cálcio dihidratado, por ser de fácil disponibilidade e manipulação como corpo de prova. A Fig. 8 exhibe os seus valores de permissividade e permeabilidade complexas em suas componentes reais e imaginárias. Observa-se que somente a partir da frequência de 9,5 GHz, os valores daqueles

parâmetros constitutivos permanecem constantes, provavelmente por causa de uma não sistemática homogeneidade da mistura gesso-água e de uma possível colocação imperfeita do gesso no porta-amostra, visto que é um material quebradiço quando sólido.

Outro material cerâmico a ser testado a seguir, versa sobre o macor. A Fig. 9 apresenta os valores da permissividade e permeabilidade complexas na banda X de frequências. Os resultados indicam claramente que os valores de ϵ (eps) e μ (mu) são consistentes até 11,0 GHz em torno das partes reais $\epsilon_r = 5,45$ e $\mu_r = 0,98$; após essa frequência os parâmetros passam a divergir com curvas ascendente e descendente, respectivamente. Buscando explicação para tal comportamento, na Fig. 10 seguem gráficos comparativos dos valores reais e imaginários de S_{11} e S_{21} com os valores analíticos calculados pelo algoritmo NRW (a partir de ϵ e μ complexos para o macor, ver na Tabela 1). Os gráficos de fato comprovam a divergência em praticamente todos os casos a partir de 11,0 GHz. Ademais resta salientar que o macor é um material frágil e quebradiço, difícil de usinar e manipular, tanto que o procedimento de colocá-lo no porta-amostra ocasionou uma fenda em sua estrutura. Tal fato pode ter causado parte dos resultados inesperados.

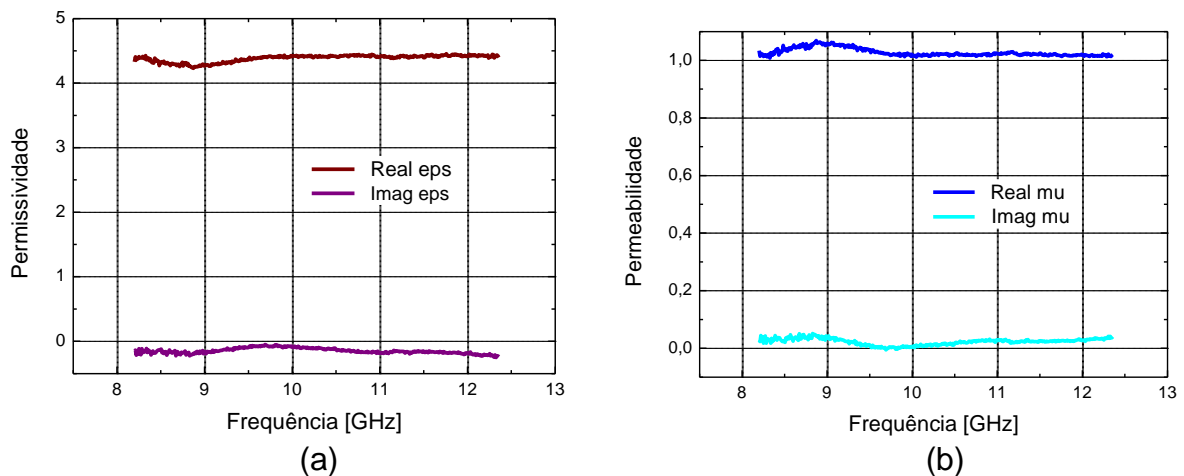


Figura 8. Valores medidos das componentes reais e imaginárias da (a) permissividade e (b) permeabilidade em função da frequência para o gesso dihidratado.

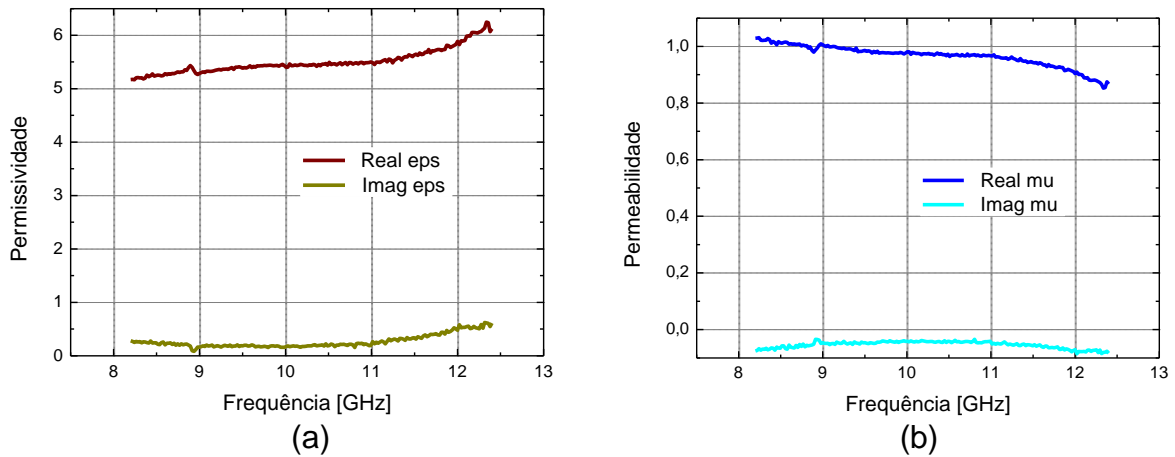


Figura 9. Valores medidos das componentes reais e imaginárias da (a) permissividade e (b) permeabilidade em função da frequência para o macor.

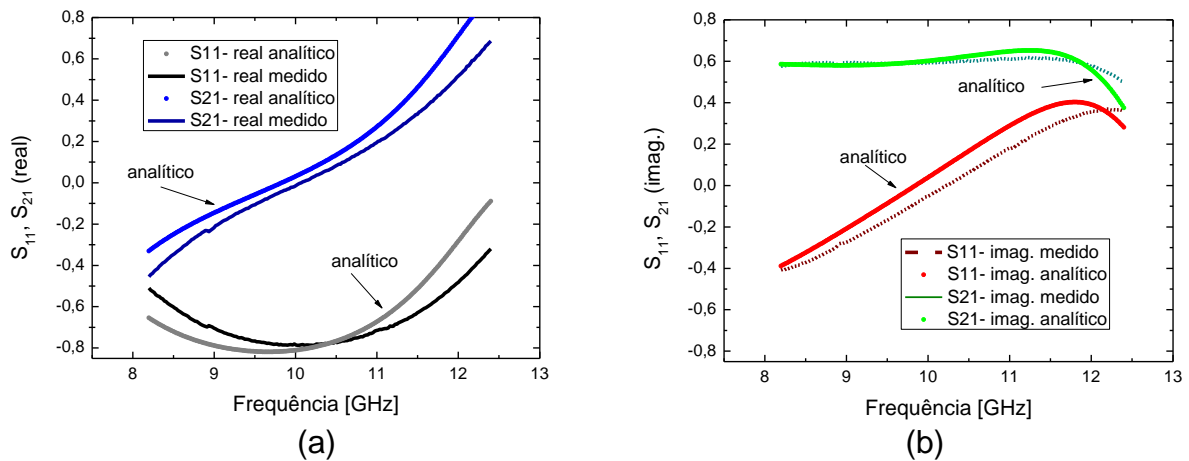


Figura 10. Valores medidos e analíticos das componentes (a) reais e (b) imaginárias dos coeficientes de reflexão (S₁₁) e transmissão (S₂₂) em função da frequência para o macor.

Tabela 1. Valores de permissividade e permeabilidade relativas e complexas dos materiais investigados na frequência de 10 GHz.

Material	Permissividade	Permeabilidade
Teflon-5 mm	2,03 - j0,005	0,99 - j0,005
Gesso	4,42 - j0,07	1,02 + j0,01
Macor	5,45 + j0,17	0,98 - j0,04

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram determinadas experimentalmente a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética complexas dos materiais – teflon, gesso e macor.

Uma vez que o valor dos parâmetros obtido pelo teflon conferiu com o valor encontrado na literatura, veio confirmar a aplicação da tecnologia proposta para a caracterização dos materiais na faixa de frequência de operação – 8,2 a 12,4 GHz. Ademais, a determinação dos coeficientes de transmissão, a partir dos valores medidos de permissividade e permeabilidade complexas, também garante uma boa confiabilidade para a técnica adotada junto com o método de cálculo utilizado. O método NRW, entretanto, possui as suas limitações por ser numericamente instável em torno das frequências de ressonância e pode não estar suficientemente otimizado para contornar os efeitos de rugosidade da amostra, o preenchimento imperfeito do corpo de prova no porta-amostra e as condições de temperatura e umidade laboratoriais. De qualquer forma, estamos diante de uma técnica relativamente simples e razoável em termos de precisão e eficiência para determinar os parâmetros constitutivos de materiais sólidos e dielétricos e a um custo muito baixo e que não requer um sofisticado conjunto de calibração e aparato computacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento CNPq e FAPESP pelo suporte.

REFERÊNCIAS

- (1) VON HIPPEL, A.R. Dielectric materials and Applications. New York: John Wiley, 1954.
- (2) MELO, M.T; BELFORT, A.; SOUZA, S.R.O.; OLIVEIRA, B.G.M. Medida da permissividade complexa do gesso tipo piso-cola com baixas perdas em frequência de microondas. In: Anais do X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Recife-PE, 2002, p. 69-72.
- (3) BAKER-JARVIS, J.; VANZURA, E.J.; KISSICK, W.A., Improved technique for determining complex permittivity with transmission/reflection method. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., v. 93, 1096–1103, 1990.
- (4) DESPHANDE, M.D.; REDDY, C.J.; TIEMSIN, P.I. A new approach to estimate complex permittivity of dielectric materials at microwave frequencies using waveguide measurements. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., v.45, 359-365, 1997.

- (5) NICOLSON, A.M.; ROSS, G.F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain. IEEE Trans. Instrum. Meas., v.19, 377–382, 1970.
- (6) WEIR, W.B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies”, Proceedings of the IEEE, v.62, 33-36, 1974.
- (7) BARROSO, J.J.; DE PAULA, A.L. Retrieval of permittivity and permeability of homogeneous materials from scattering parameters. J. Electromagn. Waves Appl., v.24, 1563-1574, 2010.

EXPERIMENTAL STUDY FOR DETERMINATION OF MATERIALS PERMITTIVITY AND PERMEABILITY WITH A CALCULATION METHOD SUPPORT

ABSTRACT

In the present study the permittivity and the permeability of different materials are measured: teflon, plaster, and macor. Electromagnetic wave transmission/reflection methods are commonly employed for characterization of solid materials. Such techniques require the measurement of transmission and reflection coefficients for a rectangular waveguide section filled with a sample of the material under investigation. The mentioned waveguide of 22.86 mm x 10.16 mm dimensions operating in the 8.2 to 12.4 GHz frequency range performs the sample holder function. Due to being a material with quite known properties, polytetrafluoroethylene (teflon) was chosen as a reference. From the measured coefficients, and using the algorithm of Nicolson-Ross-Weir (NRW) the values of materials complex permittivity and permeability are determined. The experimental and analytical results showed a good agreement reproducing values from the literature, which confirms the application of the methodology used as suitable for materials characterization in the operating frequency range.

Keywords: Electric permittivity, magnetic permeability, scattering parameters, Nicolson-Ross-Weir algorithm.