

AVALIAÇÃO DA PERMISSIVIDADE E DA PERMEABILIDADE DE MATERIAIS HOMOGÊNEOS EM ALTAS FREQUÊNCIAS A PARTIR DE PARÂMETROS DE ESPALHAMENTO

Pedro J. Castro^{1*}, Joaquim J. Barroso², Joaquim P. Leite Neto,
Miguel T. 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

O presente trabalho refere-se a um estudo experimental do teflon para medir os valores da permissividade e permeabilidade complexas relativas, analisando amostras de 5, 7 e 10 mm de comprimento. A técnica empregada requer as medições dos coeficientes de transmissão e de reflexão para uma secção de guia de onda (que opera na faixa de 8,2 a 12,4 GHz) preenchida com uma amostra do material a ser investigado. Pela facilidade de preparação das amostras, corpos de prova retangulares foram confeccionados de modo a serem devidamente colocados no trecho do guia retangular (de dimensões 22,86 mm x 10,16 mm) que desempenha a função de porta-amostra. A partir dos coeficientes medidos, usa-se um método de cálculo para determinar os valores da permissividade e permeabilidade complexas das amostras. Os resultados experimentais mostraram uma boa concordância e reproduziram valores da literatura, o que confirma a aplicação da metodologia empregada para a caracterização dos materiais para a faixa de frequência de operação.

Palavras-chave: permissividade elétrica, permeabilidade magnética, coeficiente de transmissão, coeficiente de reflexão, 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, com objetivo 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⁾.

Por ser um material cujas propriedades eletromagnéticas são bem conhecidas, foi escolhido como objeto de estudo o politetrafluoretileno, comercialmente conhecido como teflon. Pela facilidade de preparação das amostras, corpos de prova retangulares são confeccionados de modo a serem devidamente colocados no trecho do guia retangular (de dimensões 22,86 mm x 10,16 mm) que desempenha a função de porta-amostra. Para isso, amostras de teflon de comprimento 5, 7 e 10 mm foram analisadas.

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 emprega um conjunto de calibração especial junto com um aplicativo computacional ⁽⁷⁾, 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. O comprimento do trecho de guia de onda foi delimitada em torno da quarta parte do comprimento de onda guiado ($\lambda_g/4$) da frequência média (10 GHz) da faixa (8,2 - 12,4), que corresponde ao valor de 9,927 mm, arredondado para 10 mm. O comprimento de onda guiado (λ_g) é calculado conforme a equação:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (A)$$

onde c é a velocidade da luz; f , a frequência de referência (no caso, 10 GHz); f_c , a frequência de corte.

O valor da frequência de corte de um guia de onda vazio, para o modo TE_{mn} , advém da equação [7]:

$$f_{c_{mn}} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \left[\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (B)$$

onde a é o lado do guia de onda ao longo do eixo x , e b , o lado do guia de onda ao longo do eixo y . Em particular, para o modo dominante TE_{10} , $m=1$ e $n=0$ e na banda X, $a = 22,86$ mm, $\epsilon_r = 1$ (permissividade relativa do ar), $\mu_r = 1$ (permeabilidade relativa do ar), e desta forma temos que

$$f_c = c/2a\sqrt{\mu_r\epsilon_r} = 6,557 \quad (C)$$

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 anali-

sador 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 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. O corpo 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 pode 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⁾.

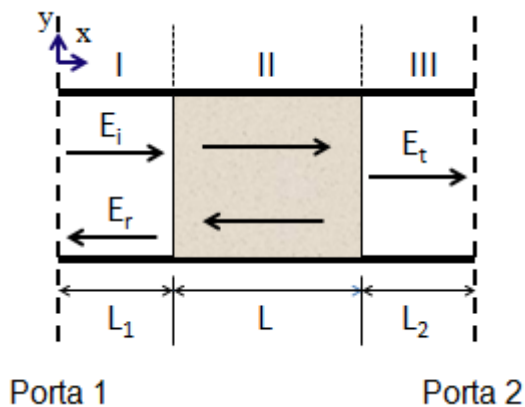


Figura 1. Esquema da estrutura do trecho de guia de onda preenchido com material a ser investigado junto com as ondas incidente, refletida e transmitida.

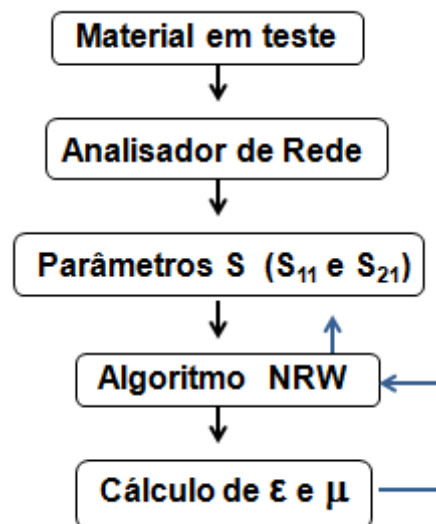


Figura 2. Diagrama em bloco do processo de avaliação da permissividade e permeabilidade de materiais.

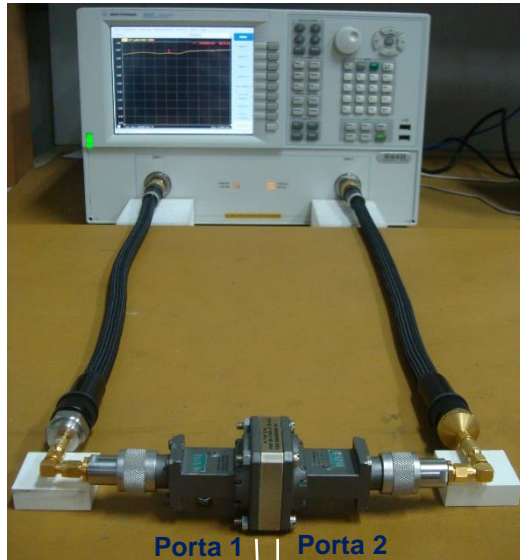


Figura 3. Montagem experimental completa para medição dos parâmetros de espalhamento.



(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 a parte imaginária, em torno de 1,00; em seguida ocorre uma ressonância ao redor de 11,5 GHz, fenômeno já explicado anteriormente.

Para confirmar a ressonância devido ao fato que o comprimento da amostra é um múltiplo de meio comprimento de onda guiado no teflon (λ_g), remontamos às equações (A) e (B), em que agora a frequência de ressonância $f = 11,5$ GHz está relacionada com o comprimento de onda (λ_0) na forma:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (C)$$

onde $\mu_r=1$, $\epsilon_r=2,03$ e a frequência de corte da onda no teflon, $f_c = 4,602$ GHz.

Esses valores substituídos em (A), obtém-se o valor final de $\lambda_g/2 \cong 10,00$ mm.

No registro da Fig. 6, os valores medidos dos parâmetros de espalhamento de partida em módulo e fase são comparados com aqueles calculados analiticamente pelo modelo de cálculo adotado: tomando os valores medidos e complexos de $\epsilon =$

$2,03 - j0,01$ e $\mu = 1,00 + j0,00$ obtém-se uma boa aproximação de valores, tanto em módulo como em fase para aqueles parâmetros.

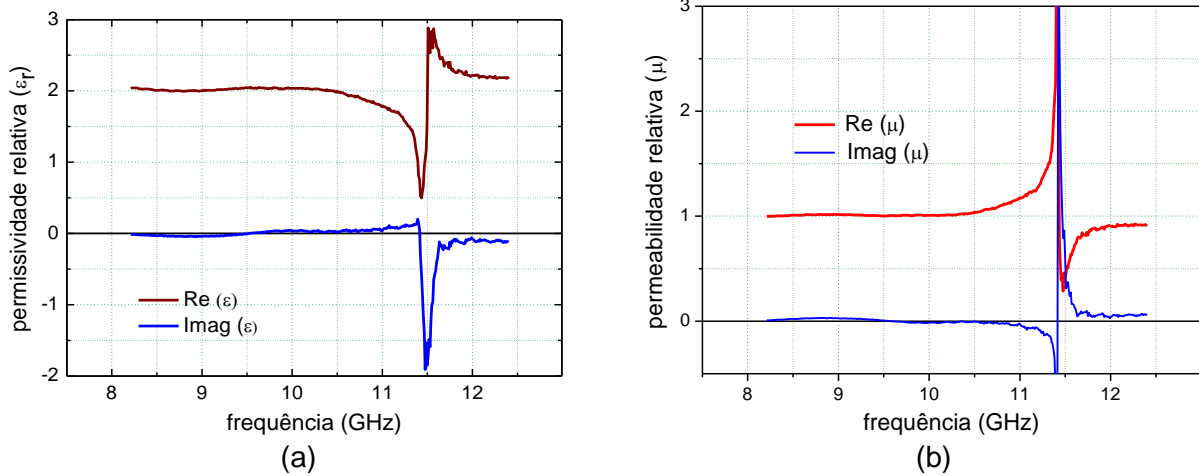


Figura 5. Partes reais e imaginárias da (a) permissividade e da (b) permeabilidade medidas para a amostra de teflon com 10 mm de espessura.

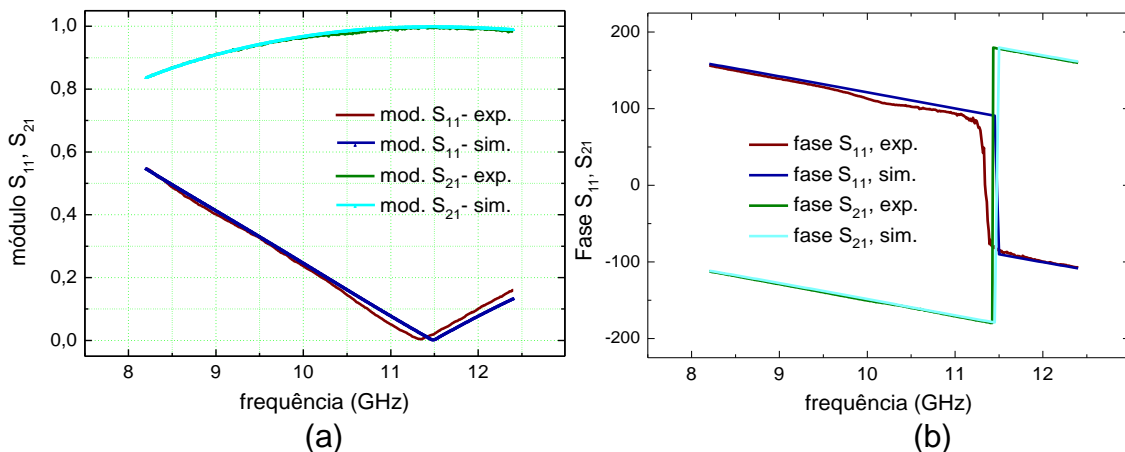


Figura 6. Comparação entre os valores medidos e os calculados pelo modelo NRW dos (a) módulos e (b) das fases de S_{11} e S_{21} para a amostra de teflon 10 mm.

Na tentativa de eliminar o problema da ressonância, foi preparada uma nova amostra, agora com 7 mm de comprimento; neste caso para o cálculo no modelo NRW, considera-se $L_1 = 7$ 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 estão praticamente contidos em torno de 2,03 e 0,002 e os valores de μ , em torno dos valores 1,00 e 0,01, respectivamente, em toda a faixa de frequência considerada, conforme demonstra a Fig. 7, e em concordância com a literatura.

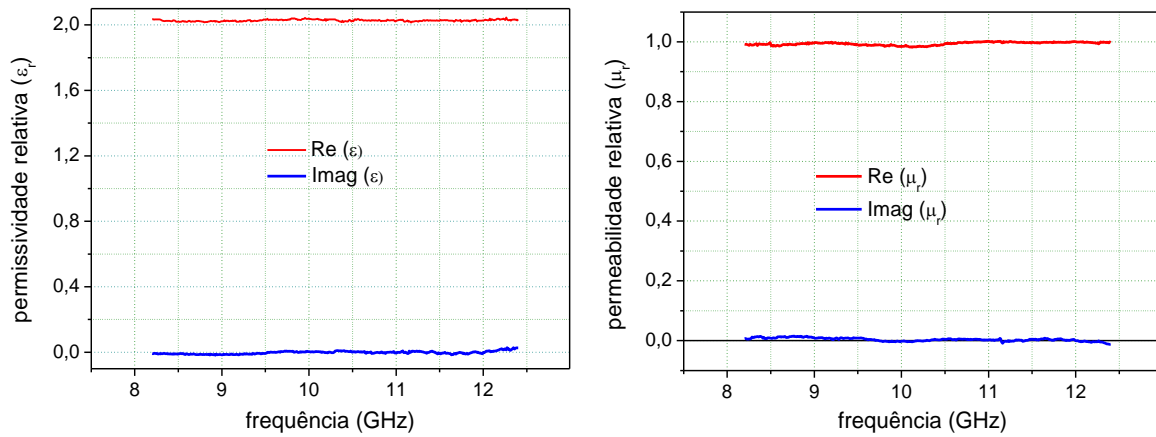


Figura 7. Valores medidos das componentes reais e imaginárias da (a) permissividade e (b) permeabilidade em função da frequência para o teflon de 7 mm de espessura.

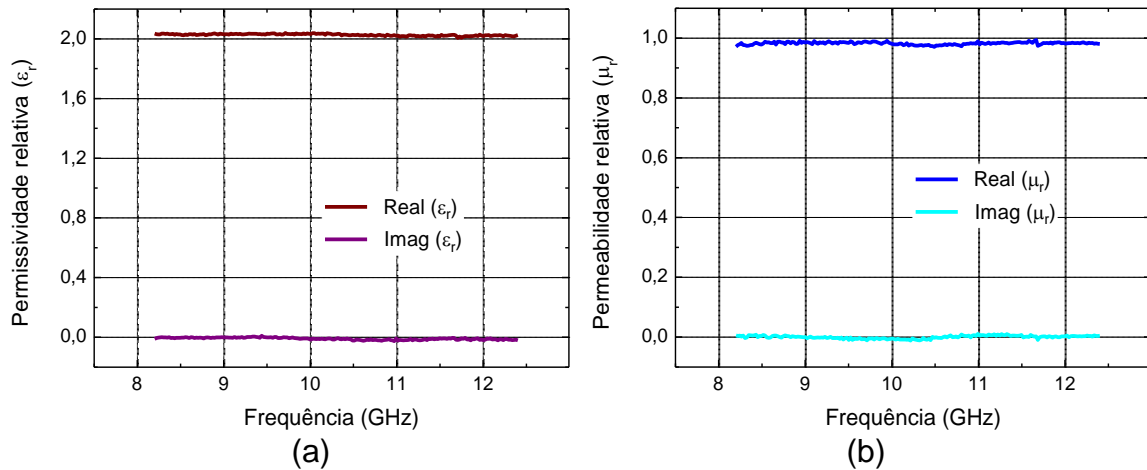


Figura 8. Valores medidos das componentes reais e imaginárias da (a) permissividade e (b) permeabilidade em função da frequência para o teflon de 5 mm de espessura.

Para finalizar, a Fig. 8 exibe os seus valores de permissividade e permeabilidade complexas em suas componentes reais e imaginárias para outra amostra de teflon, desta vez com 5 mm de espessura. Observa-se que a permissividade, como a permeabilidade em suas partes real e imaginária, permanecem praticamente constantes em toda a banda X e mais estáveis em relação às amostras anteriores.

A Tabela 1 apresenta todos os valores medidos da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética relativas e complexas para as diferentes amostras de teflon na frequência de 10 GHz, considerada um padrão em termos de frequências de micro-ondas. Como esperado, os valores da permissividade relativa do teflon não se alteram muito e está dentro da conformidade encontrada na literatura ^(7,8), considerando as procedências de diversos fabricantes do produto. Particularmente, no pre-

sente trabalho há a considerar, imperfeições nas amostras, não-homogeneidade das suas dimensões e natureza, pequenas lacunas da amostra no porta-amostra, etc.

Tabela 1. Valores medidos de permissividade e permeabilidade relativas e complexas das amostras de teflon investigadas na frequência de 10 GHz.

Material	Permissividade	Permeabilidade
Teflon-10	$2,03 + j0,002$	$1,00 + j0,004$
Teflon-07	$2,03 - j0,002$	$0,99 + j0,003$
Teflon-05	$2,04 + j0,001$	$0,99 - j0,002$

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram determinadas experimentalmente a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética complexas para amostras de teflon com diferentes espessuras – 5, 7 e 10 mm. 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 HIPPLE, 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.
- (8) BALANIS, C.A. Advanced Engineering Electromagnetics. Hobokin: John Wiley, 1989.

EVALUATION OF HOMOGENEOUS MATERIALS PERMITIVITY AND PERMEABILITY AT HIGH FREQUENCIES FROM SCATTERING PARAMETERS

ABSTRACT

The present experimental study reports on a measurement technique to determine the complex permittivity and permeability through the analysis of 5, 7 and 10 mm long teflon samples. The employed technique requires measuring the transmission and reflection coefficients for a rectangular waveguide section (which operates in the range of 8.2 to 12.4 GHz) filled with the teflon samples under investigation. Due to the easiness of sample preparation, rectangular specimens were made so that they

were properly placed in waveguide section (22.86 mm x 10.16 mm dimension) which performs the function of sample holder. From the measured coefficients, a calculation method is used to determine the complex values of permittivity and permeability. The experimental and analytical results showed a good agreement reproducing values of the literature, which confirms the methodology application employed for materials characterization in the operating frequency range.

Keywords: Electric permittivity, magnetic permeability, transmission coefficient, reflection coefficient, Nicolson-Ross-Weir algorithm.