

# Caracterização da Anisotropia na Permissividade Complexa em Compósito de Fibra de Carbono

Francisco Eduardo de Carvalho\*, Carlos Alberto Reis de Freitas\*\*,  
Antonio Carlos da Cunha Migliano\*\* e Alberto José de Faro Orlando\*

\* Instituto Tecnológico de Aeronáutica, S. J. dos Campos, Brasil

\*\* Instituto de Estudos Avançados, S. J. dos Campos, Brasil

**Resumo** — A caracterização da permissividade complexa do Compósito de Fibra de Carbono(CFC) tem contribuído para o estudo dos efeitos de descargas elétricas em estruturas aeronáuticas, admitindo-se como mecanismos de acoplamento, além da impedância associada ao material, as intensidades dos campos eletromagnéticos aplicados nas direções longitudinal e transversal da fibra. Os resultados obtidos da permissividade complexa são apresentados para a faixa de frequência de 1kHz a 40 MHz, na temperatura de 25°C.

**Palavras-chaves** — fibra de carbono composto, anisotropia elétrica, permissividade complexa.

## I. INTRODUÇÃO

Tem sido significativo o aumento da utilização do CFC[1] na construção de aeronaves, em substituição aos materiais metálicos, dado as vantagens em relação às propriedades mecânicas e químicas, tais como: baixo peso, alta rigidez e robustez, baixa corrosão, baixo custo de usinagem, e facilidade de fabricação[2]. Entretanto, a qualidade desses painéis sob efeitos de descargas elétricas vem sendo avaliada nesta última década, visando à garantia de robustez das aeronaves sob um ambiente eletromagnético com altos níveis de potência de radiação não-ionizante (RNI). O estudo da anisotropia elétrica em amostras de Fibra de Carbono Composto (CFC) tornou-se importante para o entendimento dos efeitos de descargas elétricas em estruturas aeronáuticas, para que não ocorram prejuízos estruturais quando submetidos aos pulsos de corrente de alta magnitude. Uma vez que o efeito resistivo da estrutura, associado à corrente elétrica da descarga, determina a distribuição espacial do potencial elétrico na estrutura[1], torna-se necessário caracterizar a anisotropia elétrica dessa estrutura. Esses dados poderão definir um modelo elétrico equivalente que possibilite determinar as condições de contorno no seu processo de montagem em camadas, garantindo sua rigidez dielétrica.

F. E. Carvalho, francisco.carvalho@anac.gov.br, A.C.C. Migliano, migliano@ieav.cta.br, Tel +55-12-39475515, Fax +55-12-3333333; C.A.R. Freitas, careis@ieav.cta.br, Tel. +55-12-39475517, Fax +55-12-3333333, J.C.O.Faro, faro@ita.cta.br, Tel. +55-12-39476812, Fax +55-12-3333333,

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo COMAER, através do Projeto de "Consolidação da Infra-Estrutura de Ensino, Pesquisa e Desenvolvimento no Centro Técnico Aeroespacial", apoiado ao Edital CT-INFRA 01/2001, prazo: 2002-2005. Proc:23.01.0731.00.

Para avaliar qualitativamente a anisotropia na permissividade complexa do material estudado, foram extraídas de uma única placa de CFC, amostras de geometria cilíndrica cujos eixos são paralelos aos eixos cartesianos e dimensões compatíveis com um porta amostras, conforme apresentado na Fig. 1.

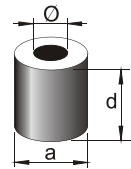


FIG. 1: Amostras cilíndricas extraídas de placa de CFC e respectivas cotas.

Os valores respectivos a cada cota constam na tabela I a seguir:

TABELA I DIMENSÕES DAS AMOSTRAS

Cota	Medida(mm)	Desvio(mm)
A	6,93	0,05
D	10,00	0,01
φ	2,93	0,05

## II. TEORIA

Uma aproximação que pode ser usada para analisar interações eletromagnéticas de compósito de fibras é lançar mão de aproximações numéricas completas, entretanto, os degraus de discretização necessitam resolver as características geométricas das fibras de compósito, que resultariam em um tempo computacional proibitivo além de requerer maior memória computacional. Mesmo os métodos de subdivisão não são suficientes para análise de painéis de compósito finos iluminados por fontes eletromagnéticas em frequências maiores que 100 MHz. Se o período de uma estrutura periódica é pequeno comparado com o comprimento de onda, as ondas vêem o compósito como um meio efetivo, e os campos médios de ordem zero (fundamental) são descritos por:

$$\nabla \times (\bar{E}^o)_{\text{médio}} = -j\omega [\mu^h] (\bar{H}^o)_{\text{médio}} \quad (1)$$

e

$$\nabla \times (\bar{H}^o)_{\text{médio}} = j\omega [\epsilon^h] (\bar{E}^o)_{\text{médio}} \quad (2)$$

As expressões (1) e (2) fazem com que os campos médios satisfaçam as equações de Maxwell em um meio homogêneo anisotrópico caracterizado pelos tensores  $[\epsilon^h]$  e  $[\mu^h]$ , portanto essas propriedades do material são chamadas permissividade e permeabilidade homogeneizadas.

Os campos médios tratam a média periódica como uma região anisotrópica efetiva não homogênea como tensores permissividade e permeabilidade e os coeficientes de reflexão e/ou transmissão da estrutura de compósito ou (homogeneizado) podem ser obtidos com aproximação das médias das camadas[2].

Podemos definir a permeabilidade complexa do material estudado como representado em (3)

$$\mu_r = \mu_r' - j \mu_r'' \quad (3)$$

O valor da permissividade do material pode ser determinado a partir da equação da impedância para uma terminação aberta[3], como segue:

$$Z_{in}^{open} = -j Z_o \cot(\gamma d) \quad (4)$$

Para uma amostra muito pequena é válida a aproximação:

$$\cot(\gamma d) \cong \frac{1}{\gamma d} \quad (5)$$

Então a impedância de entrada será

$$Z_{in} = -j Z_o \frac{1}{\gamma d} \quad (6)$$

onde a constante de propagação  $\gamma$  para a amostra no modo TEM pode ser escrita como segue:

$$\gamma = k_o \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (7)$$

onde  $k_o$  é o número de onda no vácuo pode ser escrito como

$$k_o = \frac{\omega}{c} \quad (8)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

Considerando que o material estudado é amagnético, podemos considerar a permissividade igual a 1 ( $\mu=1$ ), logo:

$$\gamma = k_o \sqrt{\epsilon_r} \quad (9)$$

e sua impedância característica pode ser obtida como segue:

$$Z_o = \frac{\eta}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \log\left(\frac{a}{b}\right) \quad (10)$$

onde  $\eta$  é a impedância intrínseca do material no vácuo e pode ser escrita como:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} \quad (11)$$

Fazendo  $\mu_o = 1$ , temos que

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_o}} \quad (12)$$

É conveniente expressarmos a impedância característica  $Z_o$  em termos de impedância  $Z_o^{ar}$  característica da mesma linha exposta ao ar como segue:

$$Z_o = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} Z_o^{ar} \quad (13)$$

Substituindo (13), (8) e (9) em (6) temos:

$$Z_{in} = -j \frac{c}{\omega d \epsilon_r} Z_o^{ar} \quad (14)$$

Para tornar explícita a permissividade escrevemos

$$\epsilon_r = -j \frac{c}{\omega d} \left( \frac{Z_o^{ar}}{Z_{in}} \right) \quad (15)$$

Sabendo-se que  $\epsilon_r$  é uma grandeza complexa que pode ser representada por:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r'' \quad (16)$$

A parte real pode ser definida por:

$$\epsilon_r' = \left[ \frac{c}{\omega d} \frac{Z_o^{ar}}{|Z_{in}|^2} \right] X_{in} \quad (17)$$

e a parte imaginária por

$$\epsilon_r'' = \left[ \frac{c}{\omega d} \frac{Z_o^{ar}}{|Z_{in}|^2} \right] R_{in} \quad (18)$$

Os eixos das amostras cilíndricas são paralelos aos eixos cartesianos, proporcionando a avaliação qualitativa da anisotropia na permissividade complexa do material. Desta maneira, a permissividade efetiva da estrutura do CFC pode ser representada pelo tensor:

$$\epsilon_{eff} = \begin{pmatrix} \alpha \epsilon_i & \beta \epsilon_j & 0 \\ 0 & \beta \epsilon_j & \gamma \epsilon_k \\ \alpha \epsilon_i & 0 & \gamma \epsilon_k \end{pmatrix} \quad (19)$$

A avaliação da anisotropia elétrica poderá ser avaliada após diagonalização do tensor de permissividade.

### III. ARRANJO EXPERIMENTAL

Por meio de medidas de impedâncias (capacitância e fator de dissipação), foram extraídos gráficos que representam a permissividade complexa do CFC na faixa de frequência de 1000 Hz a 40 MHz. As medidas, como ilustrado na Fig. 2, foram realizadas em laboratório, utilizando-se um analisador de impedâncias, ganho e fase da HP, modelo 4194A (a), com porta amostras HP, modelo 1608 acoplado (b).



Fig. 2. (a) analisador de impedância e fase HP, mod. 4194A. (b) porta amostras HP, mod.1608.

As amostras, depois de receberem uma camada de material qualificado em sua superfície de contato que permitisse um bom casamento de impedância, foram inseridas no porta amostras com o equipamento previamente calibrado.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Como resultado parcial desse trabalho, a Fig. 3 apresenta os dados de permissividade complexa (partes real e imaginária,  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) para o material estudado, considerando o eixo de simetria da amostra o versor  $\vec{i}$ , permitindo caracterizar o comportamento da impedância complexa do CFC com elevado grau de confiabilidade, levando-se em conta as limitações do equipamento.

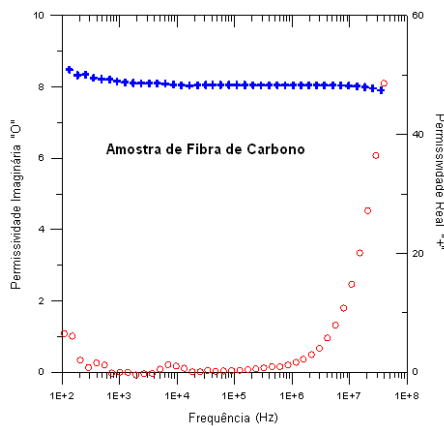


Figura 3 – Medida de permissividade complexa do CFC.

Após compilados os dados das amostras em cada um dos três eixos distintos, as medidas de permissividade complexa foram confrontadas em um único gráfico, como ilustrado na Fig. 4.

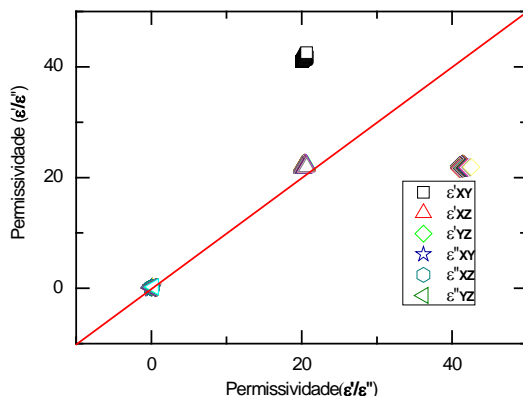


Fig. 4. Dados de permissividades, partes real e imaginária, confrontando-se em relação dos eixos

#### V. SIMULAÇÃO

A partir dos dados obtidos pelos espectros de impedância, foi possível executar simulações computacionais para avaliar os efeitos de descargas elétricas em configurações estruturais diferentes. A influência da anisotropia pode ser ilustrada pela componente Z do vetor de Poynting ( $S_z$ ), considerando a maior anisotropia nos eixos X, Y e Z respectivamente ilustradas na Fig. 5. (a), (b) e (c) abaixo.

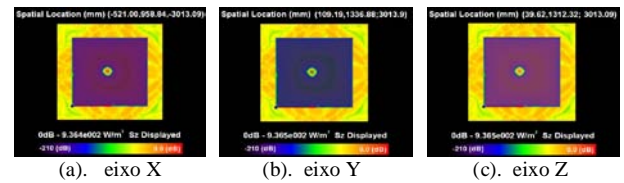


Fig. 5 – Componentes Z do vetor de Poynting ( $S_z$ ), considerando a maior anisotropia.

A Fig. 6 ilustra um exemplo de simulação computacional utilizando o Método do Domínio do Tempo por Diferenças Finitas (XFDTD) para representar a intensidade instantânea da energia eletromagnética a que fica submetida uma estrutura com geometria arbitrária no espaço tridimensional.

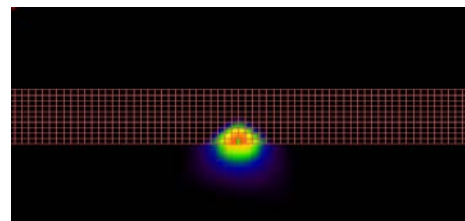


Fig. 6 – Representação da Intensidade instantânea da energia eletromagnética atravessando uma estrutura.

#### VI. CONCLUSÃO

As amostras analisadas apresentaram baixas perdas ( $\epsilon''$  tendendo assintoticamente a zero). Os valores de impedância estão associados a uma morfologia compacta e bem distribuída por toda a fibra de carbono, considerando um modelo de camada homogênea. Pela simulação é possível observar a anisotropia entre os planos YZ e YX, apontando que a maior anisotropia ocorre na direção Y.

#### REFERÊNCIAS

[1] Diane L. Heidlebaugh; Electromagnetic Effects Technology, Boeing Phantom Works, Statistical Method in Estimation Sparking Threshold for Fastened Composite Joints  
[2]Holloway,C.L., Sarto M.S.,Johanson, Analyzing Carbon-Fiber Composite Materials With Equivalent-Layer Models, IEEE Transactions on Electromagnetics Compatibility, VOL .47 ,NO 4, November, 2005, p 833-843.  
[3] A. Cortes, A. C. C. Migliano, V. L. O. Brito, A. J. F. Orlando Faro, Progress In Electromagnetics Research Symposium, Beijing, China, pp 6883-6, mach, 2007