

# AVALIAÇÃO DE FREIO AERONÁUTICO DE COMPÓSITO CARBONO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO POR ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA.

A. Ferreira<sup>1,3</sup>; L.C. Pardini<sup>2,3</sup>

1- Divisão de Sistemas Aeronáuticos (ASA) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias CEP 12.228-904 - São José dos Campos - SP - Brasil

Telefone: (12) 3947-7963 – Email: [andersonferreiracta@gmail.com](mailto:andersonferreiracta@gmail.com)

2- Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias CEP 12.228-904 - São José dos Campos - SP - Brasil

Telefone: (12) 3947-6437 – Email: [luizpardini@gmail.com](mailto:luizpardini@gmail.com)

3- Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias CEP 12.228-900 - São José dos Campos - SP - Brasil

**RESUMO:** O presente trabalho avalia por meio da técnica de espectroscopia de impedância, a arquitetura do reforço de um compósito carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC) utilizado no disco estator do freio da aeronave A-1. As medidas de impedância por corrente elétrica alternada foram realizadas na faixa de frequência de 10 Hz a 13 MHz, as impedâncias foram medidas em três direções de medição (tangencial ao disco, radial ao disco e através da espessura do disco). As impedâncias medidas foram convertidas em condutividade elétrica que especifica a natureza elétrica de um material, facilitando assim a comparação entre os resultados obtidos nas três direções de medição. O compósito CRFC do disco estator do freio da aeronave A-1 apresentou isotropia elétrica, mostrando que a arquitetura do reforço é homogeneamente distribuída.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compósitos Carbono/Carbono; freio aeronáutico; espectroscopia de impedância.

**ABSTRACT:** This study evaluates by impedance spectroscopy technique, the architecture of the reinforcement of the carbon fiber reinforced carbon (CFRC) composite used in the brake stator disc of A-1 aircraft. The electrical impedance measurements by alternating electric current were carried out in the frequency range from 10 Hz to 13 MHz, the impedances were measured in three measurement directions (tangential to the disc, radial to the disc and through the disc thickness). The impedance measurements were converted to electrical conductivity that specifies the electrical nature of a material, thus facilitating the comparison between the results obtained in the three measuring directions. The CFRC composite used in the brake stator disc of A-1 aircraft had electrical isotropy, showing that the architecture of the reinforcement is homogeneous distributed.

**KEYWORDS:** Carbon/Carbon Composites, aircraft brake; impedance spectroscopy.

## 1. INTRODUÇÃO

Nas indústrias aeronáuticas existe uma incessante busca por otimização de desempenho, de aumento na segurança e de redução de custos. Estas indústrias estão

utilizando novos materiais em substituição aos materiais metálicos normalmente utilizados. Nesse contexto, os compósitos de carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC) que constituem o sistema de frenagem de aeronaves se inserem. A Figura 1 mostra o

conjunto que constitui o pacote de frenagem de aeronaves da família 737 da Boeing. Esses materiais além de suportarem as elevadas temperaturas e os esforços mecânicos durante as frenagens, permitem a redução de consumo de combustível devido ao ganho em massa estrutural, comparados aos freios em aço [1].



**Figura 1.** Sistema de frenagem utilizado nas aeronaves da família 737 da Boeing [1].

Os compósitos CRFC são formados pela utilização de fibras de carbono e matrizes carbonosas, oriundas da pirólise de matrizes termorrígidas (resinas fenólicas), matrizes termoplásticas (piches), ou por deposição de carbono elementar, por decomposição de hidrocarbonetos, no reforço de fibras de carbono. Neste último, o processo decorre pelo preenchimento de porosidade intersticial do reforço até porosidade mínima [2, 3].

A literatura relata que elementos de freios em compósitos CRFC são obtidos pelo empilhamento de camadas bidirecionais de tecidos com configuração de reforço quase isotrópica  $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$ , em que cada conjunto é entremeadado por um véu de fibras longas e curtas de carbono [4].

A literatura científica ainda é escassa no que tange a avaliação de propriedades elétricas de compósitos. Entretanto, alguns autores encontraram nesse viés uma modalidade interessante de ensaio para caracterização e controle de qualidade [5].

Durante a manufatura de compósitos CFRFC, independentemente do tipo de matriz utilizada, ocorrem mudanças microestruturais com a formação, ou redução, de porosidade e microtrincas. No caso em que esses compósitos são manufaturados com matrizes termorrígidas ou termoplásticas, ocorre a conversão da matriz isolante (resina fenólica ou piche) em material condutor (carbono vítreo ou coque), além de liberação de voláteis não associados ao carbono. Isso permite a medição da impedância elétrica para a avaliação do processo de fabricação de compósitos CRFC além de possibilitar controle de qualidade do produto final [6].

A técnica de espectroscopia de impedância é utilizada para investigar a dinâmica de cargas elétricas ligadas ou livres em materiais. A grandeza elétrica medida nesta técnica é a impedância elétrica que pode ser representada por duas coordenadas retangulares, uma real e uma imaginária representadas respectivamente por  $Z'$  e  $Z''$  [7].

A partir da impedância elétrica determina-se a condutividade elétrica do material por meio da Equação 1. A condutividade elétrica é representada por  $\sigma$  e especifica a natureza elétrica de um material. A condutividade elétrica independe das dimensões das amostras, ou seja, é uma propriedade intrínseca do material [8, 9].

$$\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \quad (1)$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular da corrente elétrica alternada,  $\varepsilon_0$  é denominado de permissividade do vácuo, sendo uma constante universal tendo o valor  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m e  $\varepsilon_r''$  é a parte imaginária relativa da permissividade elétrica do material derivada da impedância elétrica do material conforme a Equação 2.

$$\varepsilon_r'' = \frac{Z'}{\omega C_0 (Z'^2 + Z''^2)} \quad (2)$$

Onde  $C_0$  é a capacitância da célula aberta, ou seja, quando entre os eletrodos

utilizados para aplicar a tensão ao material, tem-se ar atmosférico ao invés do material, os eletrodos tem área  $A$  e são separados pela distância  $L$ , assim  $C_0$  é obtida pela Equação 3.

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{L} \quad (3)$$

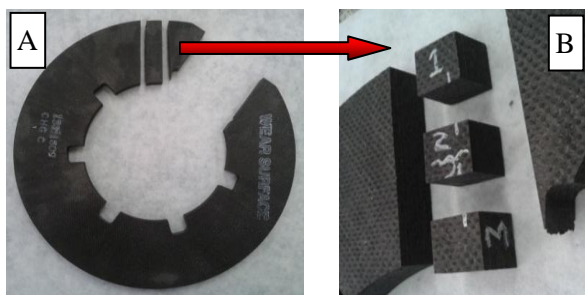
O objetivo deste trabalho foi avaliar a arquitetura do reforço de um compósito CRFC por meio da técnica de espectroscopia de impedância.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

As amostras de compósito CRFC foram obtidas de um disco estator do freio da aeronave A-1 da Força Aérea Brasileira (FAB), sendo uma peça nova proveniente do estoque da FAB.

A Figura 2 apresenta o disco estator do freio e a localização da seção das três amostras cortadas do disco numeradas de 1 a 3.

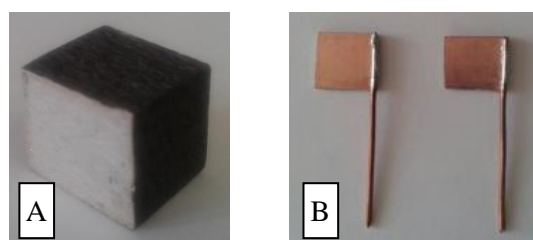


**Figura 2.** Obtenção do compósito A-1.  
(A) Disco estator do freio da aeronave A-1;  
(B) localização das três amostras cortadas.

O compósito CRFC utilizado no disco estator do freio da aeronave A-1 foi caracterizado por De Souza [10], onde verificou-se que a preforma do disco estator do freio do A1 foi montada com camadas de tecido plano empilhadas nas direções 0°, 90° e 45°, entremeadas por fibras descontínuas na forma de véu formando um arranjo próximo a reforço tridirecional de disposição das fibras.

### 2.2. Métodos

Para a medição da impedância, dois eletrodos de tinta de prata foram aplicados nas faces opostas da amostra de acordo com a direção de medição. A Figura 3A mostra uma das faces opostas pintadas de uma amostra. Para conectar a amostra ao equipamento de medição de impedância, foram construídos dois portas amostras, um para a medição da impedância na direção tangencial ao disco e o outro para a medição nas outras duas direções. Cada porta amostra é formado por duas placas de circuito impresso e em cada placa foi soldado um terminal, a Figura 3B mostra um dos portas amostras construídos. As dimensões das amostras encontram-se nas Tabelas 1, 2 e 3.



**Figura 3.** (A) Eletrodo de tinta de prata aplicado em uma das faces opostas da amostra;  
(B) porta amostra.

**Tabela 1.** Dimensões (mm) das amostras para a medição da impedância na direção tangencial ao disco.

Amostra	Distância entre os eletrodos	Seção do eletrodo
Nº 1	14,3	11,0 x 13,9
Nº 2	14,6	11,0 x 14,0
Nº 3	14,8	11,0 x 13,9

**Tabela 2.** Dimensões (mm) das amostras para a medição da impedância na direção radial ao disco.

Amostra	Distância entre os eletrodos	Seção do eletrodo
Nº 1	13,9	11,0 x 11,5
Nº 2	13,9	11,0 x 11,5
Nº 3	14,1	11,0 x 11,4

**Tabela 3.** Dimensões (mm) das amostras para a medição da impedância na direção através da espessura do disco.

Amostra	Distância entre os eletrodos	Seção do eletrodo
Nº 1	11,0	11,1 x 11,6
Nº 2	11,0	11,4 x 12,0
Nº 3	11,0	11,3 x 12,2

A Figura 4 mostra a montagem final para a medição da impedância das amostras instaladas nos respectivos portas amostras, realizada por meio do analisador de impedância 4192A LF e da *test fixture* 16047C.



**Figura 4.** Esquema final para a medição da impedância.

Os detalhes da técnica de medição de impedância estão descritos no trabalho de Ferreira [6].

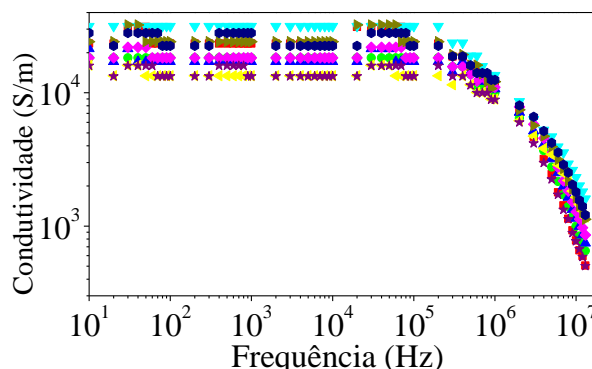
As impedâncias das amostras foram convertidas em condutividade elétrica por meio da Equação 1.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta o comportamento da condutividade em função da frequência da corrente elétrica para as três amostras do compósito A-1, em cada amostra foi determinada a condutividade em três direções de medição (direção tangencial ao disco, direção radial do disco e através da espessura do disco), ou seja, a Figura 5 apresenta todas as nove curvas de condutividade.

Os resultados mostrados na Figura 5 estão em concordância com a caracterização realizada por De Souza [10], ou seja, revelou a isotropia elétrica do disco, uma vez que os valores de condutividade das nove curvas estão próximos entre si.

Na Figura 5 observa-se condutividade constante até a ordem de  $10^5$  Hz e decréscimo da condutividade a partir desta frequência. O valor constante no início da faixa de frequência representa a condutividade DC do material e o decréscimo da condutividade ocorre devido ao efeito pelicular no material, fenômenos explicados por Ferreira [6]. Neste trabalho a partir deste ponto, serão comparadas as condutividades no início da faixa de frequência, ou seja, as condutividades DC.



**Figura 5.** Condutividade elétrica para as três direções de medição das três amostras do compósito A-1.

A condutividade de um material compósito depende principalmente das condutividades das suas fases constituintes e da direção de medição [11].

A condutividade longitudinal de fibras de carbono é na ordem de  $10^5$  S/m e a condutividade transversal das fibras é na ordem de  $10^3$  S/m [12].

Em compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono sem geometria de reforço tridirecional, a condutividade do compósito na direção das fibras é na ordem de  $10^4$  S/m e depende principalmente da condutividade longitudinal da fibra de carbono, entretanto, a condutividade através da espessura do compósito depende



principalmente dos pontos de contato entre as camadas adjacentes de fibras e da matriz que entremeia as camadas. Nestes compósitos a condutividade através da espessura apresenta valores na ordem de 1 S/m, valor muito menor que a condutividade do compósito na direção das fibras conferindo ao compósito natureza anisotrópica [13].

Em compósitos CRFC a condutividade na direção das fibras é da ordem de  $10^4$  S/m. Por outro lado, a condutividade através da espessura apresenta valores entre  $10^2$  e  $10^3$  S/m [2, 6]. Estes valores são maiores do que a condutividade através da espessura de compósitos bidirecionais de fibras de carbono com matriz polimérica. A condutividade de carbono vítreo é da ordem de  $10^4$  S/m [14].

Retornando aos resultados mostrados na Figura 5, todas as nove curvas de condutividade apresentaram valores de condutividade na ordem de  $10^4$  S/m independentemente da direção de medição, ou seja, a geometria de reforço tridirecional juntamente com a matriz carbonosa conferiu ao compósito A-1 isotropia elétrica.

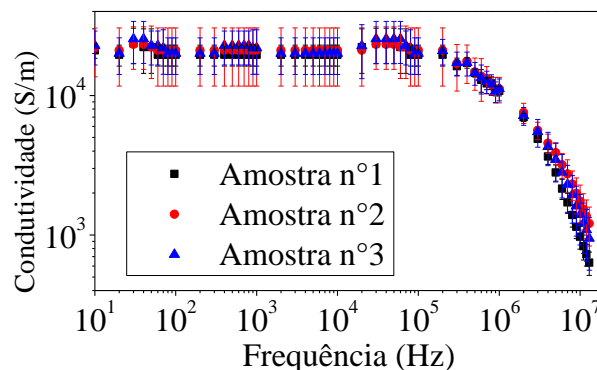
Com o objetivo de identificar singularidades com relação à homogeneidade e isotropia do disco, levando em conta a posição da amostra e a direção de medição, foram determinados os resultados médios apresentados nas Figuras 6 e 7.

A Figura 6 apresenta o comportamento da condutividade em função da frequência da corrente elétrica por amostra do compósito A-1. Foi determinada a média e o desvio padrão das condutividades das três direções de medição (direção tangencial ao disco, direção radial do disco e através da espessura do disco) para cada amostra.

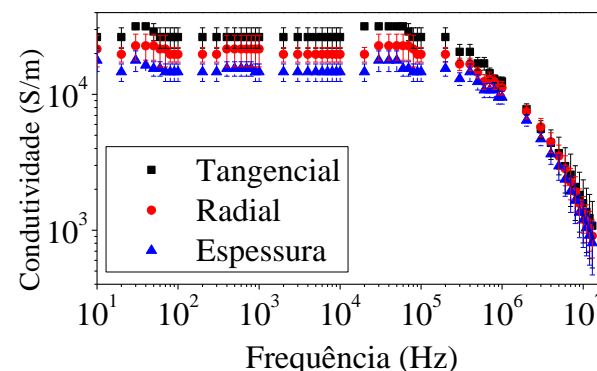
Os resultados apresentados na Figura 6 mostraram que as três amostras apresentaram condutividades médias e desvios praticamente iguais, mostrando a homogeneidade espacial do disco na região de corte das amostras.

A Figura 7 apresenta o comportamento da condutividade em função da frequência da corrente elétrica para cada direção de medição. Foi determinada a média e o desvio padrão das

condutividades das três amostras do compósito A-1 para cada direção de medição.



**Figura 6.** Condutividade elétrica por amostra do compósito A-1.



**Figura 7.** Condutividade elétrica por direção de medição do compósito A-1.

Os resultados apresentados na Figura 7 revelaram que a condutividade média através da espessura do disco é marginalmente menor do que as condutividades médias determinadas no plano. Na direção da espessura o véu de fibras descontínuas situa-se entre as camadas de fibras contínuas, ou seja, na direção da espessura os elétrons não encontram um caminho contínuo pelas fibras, ao contrário da condução no plano, na qual, as fibras contínuas facilitam o fluxo dos elétrons, atribuindo maior condutividade às direções no plano do disco. Entretanto, mesmo considerando a diferença marginal entre as condutividades mostradas na Figura 7, podemos classificar o disco como isotrópico elétrico considerando que um compósito CRFC sem arquitetura tridirecional de reforço

apresenta condutividades através da espessura entre  $10^2$  e  $10^3$  S/m [2, 6].

#### 4. CONCLUSÃO

A técnica de espectroscopia de impedância pode ser utilizada na avaliação da arquitetura do reforço de um compósito CRFC. As condutividades determinadas nas três direções de medição confirmaram a geometria de reforço tridirecional do compósito CRFC do disco estator do freio da aeronave A-1, ou seja, o disco apresentou isotropia elétrica. A técnica apresentou sensibilidade para identificar condutividade marginalmente menor na direção através da espessura do compósito, característica decorrente do véu de fibras descontínuas que situa-se entre as camadas de fibras contínuas, ao contrário da condução no plano, na qual, as fibras contínuas facilitam o fluxo dos elétrons e conferem ao compósito condutividade marginalmente maior no plano.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOEING. Operational Advantages of Carbon Brakes. 2009. Disponível em: <[http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_03\\_09/pdfs/AERO\\_Q309\\_article05.pdf](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_03_09/pdfs/AERO_Q309_article05.pdf)>. Acesso em: 3 mai. 2016.
- [2] SINGH, S.; SRIVASTAVA, V. K. Electrical properties of C/C and C/C-SiC ceramic fibre composites. *Ceramics International*, v. 37, p. 93-98, 2011.
- [3] PARDINI, L. C.; GONÇALVES, A. Processamento de compósitos termoestruturais de carbono reforçado com fibras de carbono. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 1, n. 2, p. 231-241, dec. 2009.
- [4] US Patent 2016/0176125 A1 - Methods to fabricate needled preforms with randomly oriented short length carbon fibers. Jean-Francois Le Costaouec, 2016.
- [5] YAMAMOTO, N.; VILLORIA, R. G.; WARDLE, B. L. Electrical and thermal property enhancement of fiber-reinforced polymer laminate composites through controlled implementation of multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, v. 72, p. 2009-2015, Nov. 2012.
- [6] FERREIRA, A. Avaliação da conversão de compósitos de fibra de carbono/resina fenólica em compósitos carbono reforçado com fibras de carbono por espectroscopia de impedância. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2016.
- [7] BARSOUKOV, E.; MACDONALD, J. R. Impedance spectroscopy: theory, experiment and applications. 2nd. ed. Hoboken: Wiley, 2005.
- [8] ELIMAT, Z. M. et al. Dielectric properties of epoxy/short carbon fiber composites. *Journal of Materials Science*, v. 45, n. 19, p. 5196-5203, Oct. 2010.
- [9] PRADHAN, D. K.; CHOUDHARY R. N. P.; SAMANTARAY, B. K. Studies of dielectric relaxation and ac conductivity behavior of plasticized polymer nanocomposite electrolytes. *Int. J. Electrochem. Sci.*, v. 3, p. 597-608, 2008.
- [10] DE SOUZA, M. A. M. Comportamento tribológico de materiais de carbono. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.
- [11] SAWI, I. E. et al. Processing and electrical characterization of a unidirectional CFRP composite filled with double walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, v. 73, n.1, p. 19-26, Nov. 2012.
- [12] VAÑÓ, F. J. I. Thermoelectric characterization of the CFRP (carbon fiber reinforced plastic) in aircraft. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2013. 181 p. Project.
- [13] CHENG, J. et al. Novel electromagnetic modeling approach of carbon fiber-reinforced polymer laminate for calculation of eddy currents and eddy current testing signals. *Journal of Composite Materials*, v. 49, n. 5, p. 617-631, 2015.
- [14] BHATIA, G. et al. Conversion of phenol formaldehyde resin to glass-like carbon. *Journal of Materials Science*, v. 19, n.13, p. 1022-1028, Mar. 1984.