

Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Estudo do efeito Joule em compósitos à base de fibra de carbono

Bolsista: Leonardo Sanches

Orientador(a): Dr^a Adriana Medeiros Gama

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2017 a Agosto de 2018

Resumo

A dissipação de calor de um resistor (Efeito Joule) é utilizada recorrentemente em inúmeras aplicações industriais e comerciais. Na indústria aeronáutica e aeroespacial, por exemplo, a aplicação de Efeito Joule, para fins de proteção a contaminação por gelo e a remoção do mesmo, vem ganhando cada vez mais destaque através de sistemas desenvolvidos e voltados na utilização de tensão elétrica denominados *anti-icing* eletrotérmicos. Este interesse pelo Efeito Joule é devido as tendências de conceitos mais elétricos de aeronaves desenvolvidos, visando com isso a redução de peso. Assim, o projeto visa o desenvolvimento de um compósito a base de fibra de carbono, visando o estudo do seu comportamento ao ser submetido a uma corrente elétrica, buscando a obtenção de Efeito Joule do mesmo. Quantificando e potencializando sua capacidade calorífica através da adição de pó de ferrocarbonila na matriz polimérica do compósito. Desta forma, propondo sua aplicação como elemento de *anti-icing*, podendo ser aplicado para fins de revestimento ou compósito estrutural em aeronaves.

1. Introdução

O Efeito Joule é comumente presente em inúmeros equipamentos utilizados diariamente como chuveiros, lâmpadas incandescentes, ferros de passar roupa, etc. Ele consiste na dissipação de calor gerado por uma corrente elétrica ao percorrer um dado condutor (Passos, 2009). As aeronaves enfrentam inúmeras adversidades em vôo, uma delas é a formação de gelo em seu perfil aerodinâmico que ocorre devido as nuvens contendo gotículas de água super-resfriadas, nuvens com mistura de gotículas de água super-resfriada e cristais de gelo, e

por chuva congelante (Reinmann, 1994; Pourbagian, 2014). Este acúmulo de gelo ocorre de forma laminar (ao longo do perfil aerodinâmico) ou de forma pontual (pequenos blocos de gelo) no bordo de ataque da aeronave. Em ambos os casos, a contaminação por gelo leva a diminuição do coeficiente de elevação e do ângulo de ataque, assim como o aumento do arrasto e de peso, ocasionando a perda de sustentação (*stall*), além de danos que levam ao deterioramento do revestimento da aeronave (Reinmann, 1994; Pourbagian, 2014; Zhang et al., 2016).

Os sistemas de proteção à formação de gelo são amplamente utilizados na indústria aeronáutica e são divididos em dois grupos: sistema de *deicing* e sistema *anti-icing*. Os sistemas de *deicing* permitem a formação do gelo, fazendo a remoção do mesmo através de um esforço mecânico aplicado por um atuador eletromecânico ou atuador pneumático. Os sistemas de *anti-icing* não permitem a formação do gelo, mantendo a água em estado líquido ou evaporando-a através de sangramento de ar quente do motor para os locais de formação de gelo ou através de sistemas eletrotérmicos (utilização de Efeito Joule) (Reinmann, 1994; Amirfazli e Mohseni, 2012; Pourbagian, 2014). Os sistemas eletrotérmicos tem se mostrado promissores para os fins de *anti-icing*, pois, além de eficientes, são versáteis em sua instalação, podendo ser utilizado como sistema complementar de *anti-icing* (instalados no bordo de fuga e/ou *flaps*, locais que sofrem com o fluxo de água de degelo vinda do bordo de ataque) em aeronaves de grande porte ou como sistema primário em aeronaves de pequeno porte (Al-Khalil, 1997; Canelos, 2006; Amirfazli e Mohseni, 2012).

Observando-se essas características e tendências dos sistemas eletrotérmicos de *anti-icing*, o presente projeto tem como objetivo o estudo do Efeito Joule, isto é, a aplicação de corrente elétrica contínua visando à obtenção de calor em compósitos poliméricos a base de fibra de carbono. Dessa forma propondo a utilização de tais compósitos não somente para fins estruturais ou de revestimento, mas também, como elemento eletrotérmico utilizado como sistema *anti-icing*.

2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais

2.1.1 Resina Epóxi

A resina é um composto orgânico derivado do petróleo e que tem sua mudança de estado líquido para sólido através de reações químicas denominada polimerização, onde as resinas

termofixas curam de forma irreversível, devido a sua estrutura molecular interligada (Garland, 2009). A resina epóxi é uma resina termofixa que detém boas propriedades mecânicas e químicas, tornando-a uma opção economicamente viável para a aplicação no desenvolvimento de compósitos de laminação. O termo epóxi é atribuído ao grupo que constitui um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. Existem quatro tipos de resinas epóxis comercializadas, contudo, devido ao seu baixo custo e sua versatilidade, a resina epóxi a base de Bisfenol-A é a mais comumente utilizada (Al-Qureshi, 2002). A resina utilizada no projeto foi a EPOCAST 50-A1.

2.1.2 Fibra de Carbono

As fibras de carbono são as mais utilizadas no ramo aeronáutico e aeroespacial, e são produzidas através de fibras percussoras ricas em carbono. Atualmente, a fibra percussora de poliacrilonitrila (PAN) é a mais utilizada, gerando fibras de carbono com alto grau de resistência, contudo seu preço final é maior devido a seu alto custo de produção. Tais fibras possuem os maiores módulos específicos e maiores resistências específicas em comparação a todos os outros reforços fibrosos, mantendo essas características mesmo em condições de elevadas temperaturas (Al-Qureshi, 2002; Garland, 2009). A fibra de carbono utilizada foi a do tipo 282-50" GRAPHITE Plain-weave da empresa HEXCEL.

2.1.3 Ferrocarbonila

A ferrocenona é um composto de ferro de alta pureza obtido da decomposição química da pentacarbonil de ferro, e sua aparência é de um pó cinzento composto por micro-partículas esféricas. As aplicações da ferrocenona são inúmeras. No ramo da eletrônica ela é usada na fabricação de núcleos magnéticos para bobinas de alta frequência, no ramo militar, é usada como componente de absorção de energia radar, na metalurgia do pó, é usada em peças moldadas por injeção de metal, etc. No projeto proposto, a ferrocenona foi utilizada como aditivo magnético na matriz polimérica do compósito, com a finalidade de potencializar o efeito condutor do compósito, criando um comparativo de eficiência calorífica entre uma amostra de compósito com e sem adição de ferrocenona (Fukushima, 2016).

2.2 Métodos

2.2.1 Amostras do compósito

Foram confeccionadas quatro amostras de 5x5 cm e 3 mm de espessura de compósitos para serem submetidas a correntes elétricas contínuas, variando o potencial elétrico aplicado, afim de se obter a resistência (R) para o cálculo do calor (Q) gerado ao longo de um tempo (t). A figura 1 apresenta o layout adotado para a confecção das amostras de compósito.

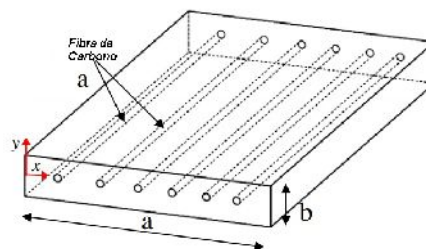


Figura 1: Layout das amostras confeccionadas.

Duas amostras foram processadas utilizando-se resina epóxi pura, variando apenas, o número de cabos de fibra de carbono e o espaçamento entre elas. Duas amostras foram confeccionadas com resina epóxi misturada com pó de ferrocenila numa proporção de 50g/50g, variando o número de cabos para cada amostra.

As amostras sem adição de ferrocenila, ilustradas na figura 2, foram confeccionadas com variação de dez e vinte cabos de fibra de carbono, tendo espaçamento entre si de 5mm e 3 mm, respectivamente.

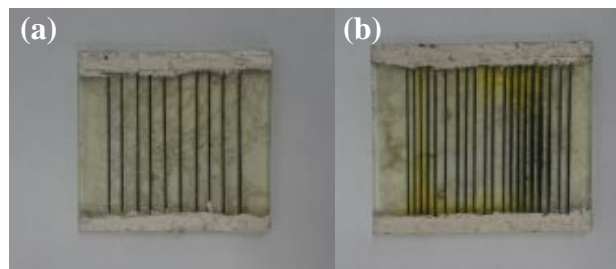


Figura 2: Amostras sem adição de ferrocenila com (a) dez e (b) vinte cabos de fibra de carbono.

As amostras com adição de pó de ferrocenonila, ilustradas na figura 3, foram confeccionadas, também, com variação de dez e vinte cabos de fibra de carbono, tendo espaçamento entre si de 5mm e 3 mm, respectivamente.

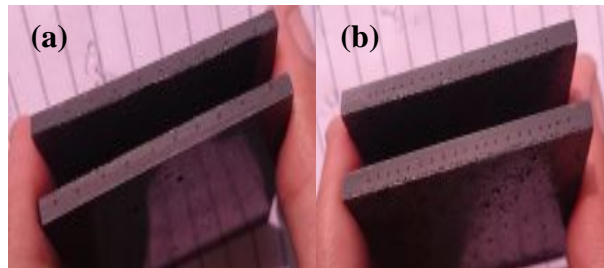


Figura 3: Amostras com adição de ferrocenonila com (a) 10 e (b) 20 cabos de fibra de carbono.

As amostras foram confeccionadas com a utilização de um tear manual (figura 4), onde os cabos de fibra de carbono foram trançados ao longo do eixo longitudinal do compósito, variando de um em um milímetro o espaçamento entre os cabos.

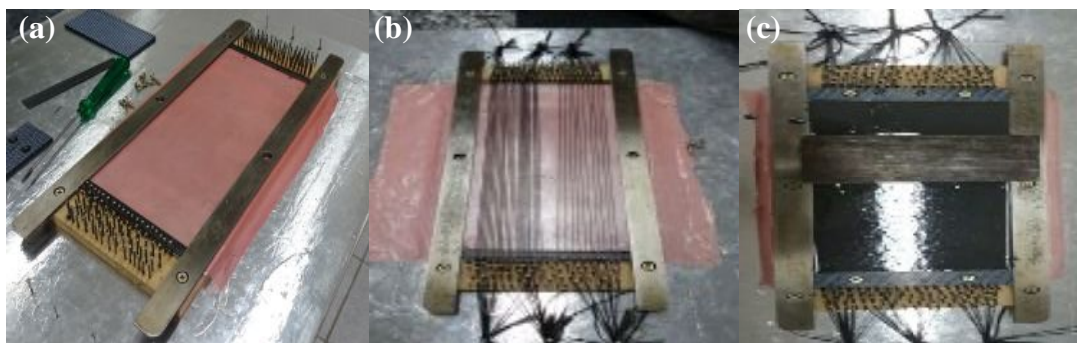


Figura 4: Tear manual utilizado na confecção dos compósitos, (a) tear, (b) tear com os cabos de fibra de carbono e (c) compósito à base de fibra de carbono e pó de ferrocenonila.

2.2.2 Ensaios elétricos

Os ensaios elétricos foram conduzidos utilizando um conceito de circuito elétrico simples, dotado de uma fonte de potencial elétrico e um elemento resistivo, como demonstrado na

figura 5. Esse conceito possibilita a determinação da resistência elétrica (R) pontualmente através dos cálculos da Lei de Ohm.

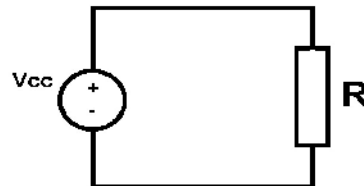


Figura 5: Conceito de circuito elétrico utilizado nos ensaios elétricos.

A figura 6 apresenta a aplicação do conceito de circuito citado, utilizando-o nas amostras confeccionadas a fim de determinar suas respectivas resistências elétricas. Os ensaios foram conduzidos através da aplicação de tensões elétricas comercialmente utilizadas de 3 volts, 6 volts, 9 volts e 12 volts. A amostra (que funciona como o elemento resistivo do circuito) é ligada a uma fonte de tensão, estando em série com um multímetro, que por sua vez nos mostra as correntes elétricas correspondente a cada potencial elétrico aplicado.

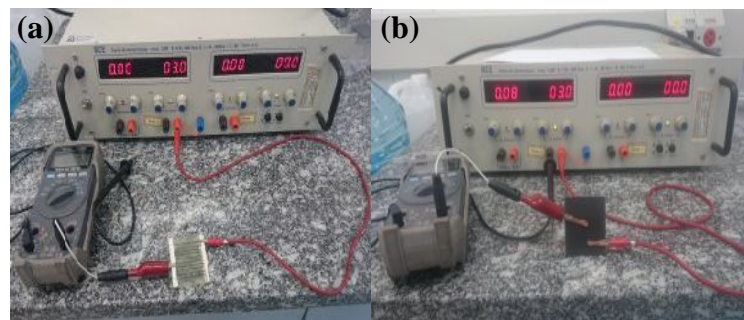


Figura 6: Ensaios elétricos conduzidos nas amostras de compósitos (a) sem pó de ferrocarbonila e (b) com pó de ferrocarbonila.

2.2.3 Cálculos do efeito Joule

Para a obtenção da quantidade de calor gerada é preciso, primeiramente, determinar a quantidade de energia (W) necessária para uma corrente (I) percorrer uma resistência (R) durante um determinado tempo (t), dada pela equação 1, denominada Lei de Joule.

$$W = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [J]} \tag{1}$$

A quantidade de energia calcula dissipa uma quantidade de calor. Essa dissipação de calor é denominada Efeito Joule, e é dada pela equação 2.

$$Q = W/J \text{ [cal]} \quad (2)$$

Onde Q é a quantidade de calor dada em calorias, W é a quantidade de energia dada em Joule e J é uma constante de conversão obtida através de dados experimentais, representando a quantidade de energia em Joule para se aquecer um grama de água em um grau Celsius, sendo esse valor, padronizado pelo Sistema MKS, de 4,18 Joule/Cal.

3. Resultados e discussão

Os ensaios foram realizados visando como resultado a demonstração da capacidade calorífica do compósito de cabo de fibra de carbono. Demonstrando, assim, seu potencial como elemento de proteção a formação de gelo. Os resultados obtidos para cada amostra são apresentados nas tabelas 1, 2, 3 e 4.

Tabela 1: Amostra com 10 cabos de fibra de carbono com adição de ferrocarbonila

Tensão V [V]	Corrente I [A]	Resistência R [Ω]	Tempo t [s]	Potência P [J/s]	Calor Q [cal]	Temp. Ti [°C]	Temp. Tf [°C]
3	0,091	32,976	300	0,273	19,593	25	28
6	0,094	63,830	300	0,564	40,478	25	28,5
9	0,135	66,667	300	1,215	87,201	25	31
12	0,160	75	300	1,920	137,710	25	36

Tabela 2: Amostra com 10 cabos de fibra de carbono sem adição de ferrocarbonila

Tensão V [V]	Corrente I [A]	Resistência R [Ω]	Tempo t [s]	Potência P [J/s]	Calor Q [cal]	Temp. Ti [°C]	Temp. Tf [°C]
3	0,033	90,909	300	0,099	7,105	25	26
6	0,045	133,333	300	0,270	19,378	25	27,5
9	0,072	125	300	0,648	46,507	25	29
12	0,091	131,868	300	1,092	78,373	25	31,5

Tabela 3: Amostra com 20 cabos de fibra de carbono com adição de ferrocarbonila

Tensão V [V]	Corrente I [A]	Resistência R [Ω]	Tempo t [s]	Potência P [J/s]	Calor Q [cal]	Temp. Ti [°C]	Temp. Tf [°C]
3	0,096	31,250	300	0,288	20,670	25	28,5
6	0,110	54,545	300	0,660	47,368	25	36
9	0,220	40,909	300	1,980	142,105	25	44,5
12	0,253	47,431	300	3,036	217,895	25	51

Tabela 4: Amostra com 20 cabos de fibra de carbono sem adição de ferrocarbonila

Tensão V [V]	Corrente I [A]	Resistência R [Ω]	Tempo t [s]	Potência P [J/s]	Calor Q [cal]	Temp. Ti [°C]	Temp. Tf [°C]
3	0,037	81,081	300	0,111	7,967	25	26,5
6	0,080	75	300	0,480	34,450	25	31
9	0,096	93,750	300	0,864	62,010	25	35
12	0,105	114,286	300	1,260	90,431	25	41,5

De acordo com os resultados apresentados, a variação do número de cabos de fibra de carbono (10 e 20 cabos) nas amostras sem adição de ferrocarbonila gerou um aumento médio de 23,5% na corrente elétrica do compósito, que por sua vez, gerou um aumento na dissipação de calor média na mesma proporção. A variação do número de cabos de fibra de carbono (10 e 20 cabos) nas amostras com adição de ferrocarbonila gerou um aumento médio 24% na corrente elétrica, assim gerando um aumento proporcional na quantidade de calor dissipado. Dessa forma, a variação do número de cabos no compósito tende a melhorar seu comportamento condutor e, em consequência disso, melhora sua capacidade calorífica.

A adição de ferrocabolina na matriz polimérica, como aditivo magnético, gerou um aumento médio de 50,5% na amostra com dez cabos de fibra de carbono em comparação a amostra com o mesmo número de cabos, porém sem a adição de ferrocarbonila, gerando um aumento calorífico médio na mesma proporção. A amostra com vinte cabos de fibra de carbono e com a adição de ferrocarbonila tem um aumento médio de 51,25% em sua corrente elétrica, e por

sua vez na sua capacidade calorífica, em relação à amostra com vinte cabos e sem o aditivo magnético.

Esse aumento substancial nas características elétricas do compósito ocorreu devido ao caráter condutor da ferrocarbonila, que atenua as características isolantes da matriz polimérica, melhorando assim a condutividade do compósito e lhe atribuindo maior dissipação de calor (Efeito Joule).

4. Próximas Etapas

O aluno encerra suas atividades de iniciação científica devido ao término do seu curso de graduação.

5. Conclusões

Os resultados obtidos demonstraram que ocorreu a dissipação de calor (Efeito Joule) em todas as amostras, contudo as amostras com adição de ferrocarbonila apresentaram o maior valor de potência e maior dissipação de calor, atestando sua eficiência como aditivo potencializador da corrente elétrica. Além disso, a matriz polimérica das amostras com 20 cabos de fibra de carbono sofreu degradação em tensões iguais ou superiores a nove volts, devido a alta temperatura gerada no cabo de fibra de carbono, que por sua vez é devida ao elevado grau de condutividade do mesmo.

Referências

AL-KHALIL, K.; FERGUSON, T; PHILIPS, D. A hybrid anti-icing protection system. In: AEROSPACE SCIENCES MEETING & EXHIBIT, 35th, 1997. Reno. **Proceedings...** Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. p.1-8.

AL-QURESHI, H. **Apostila de Introdução aos materiais plásticos reforçados.** Florianópolis: LabMat - UFSC, 2002.

CARNELOS, L. L. **Anti-icing / deicing systems for a more electric aircraft concept.** 2006. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.

FUKUSHIMA, J.C. **Desenvolvimento e caracterização de um elastômero magneto-reológico para aplicação em absorvedores de vibração mecânica.** 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.



GARLAND G. LEE. **Compósitos 1:** materiais, processos, aplicações, desempenho e tendências. São Paulo: ABMACO, 2009.

MOHSENI, M.; AMIRFAZLI, A. A novel electro-thermal anti-icing system for fiber-reinforced polymer composite airfoils. **Cold Regions Science and Technology**, v. 87, p. 47-58, Mar. 2013.

PASSOS, J. C. Os experimentos de Joule e a 1ª Lei da Termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensina de Física**, v. 31, n. 3, p.1-8, jul./set. 2009.

POURBAGIAN, M. **Multidisciplinary optimization of in-flight electro-thermal ice protection system**. 2014. 194f. Thesis (PhD in Mechanical Engineering) - McGill University, Montreal, 2014.

REINMANN, J. J. **Icing:** accretion, detection, protection. Washington, D.C.: NASA Technical Reports Server, 1994.

ZHANG, F. et al. Reliability analysis of bleed air anti-icing system based on subset simulation method. **Applied Thermal Engineering**, v. 115, p. 17-21, Mar. 2017.