

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MALHA METÁLICA NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DA SOLDAGEM DE COMPÓSITOS PEI/FIBRA DE VIDRO E FIBRA DE CARBONO.

L.F.B. Marques<sup>1\*</sup>; M.P.S. Ribeiro<sup>1</sup>; W.H. Santana<sup>1</sup>; A.B.R.M. Abrahão<sup>1,2</sup>;  
L.L.G.Silva<sup>1,2</sup>; M.L. Costa<sup>2</sup>; E.C. Botelho<sup>2</sup>

1 Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba- FATEC  
Rod. Vereador Abel Fabrício Dias, 4010 - Água Preta - Pindamonhangaba/SP,  
CEP.: 12445-010, Brasil  
Telefone: (12) 3642-5648  
[\\*marqueslfb@gmail.com](mailto:*marqueslfb@gmail.com)

2 Departamento de Materiais e Tecnologia- FEG/UNESP  
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333- Portal das Colinas- Guaratinguetá/SP,  
CEP.: 12516-410, Brasil  
Telefone: (12) 3123-2800

**RESUMO:** Para o desenvolvimento de produtos e aplicações no mercado é necessário estudos para garantia do bom desempenho dos materiais em suas utilizações. A soldagem por resistência elétrica, quando aplicada a materiais compósitos poliméricos, tem-se apresentado como uma alternativa viável de união destes materiais, entretanto, no processamento há necessidade da utilização de um elemento resistivo (implante) entre as juntas soldadas sendo maioria das vezes utilizado uma malha metálica de aço inox. Após a soldagem a malha metálica torna-se um elemento contaminante tornando a região propícia a início de corrosão. O presente trabalho visa analisar o efeito da malha metálica de aço inox AI 304, utilizada como elemento resistivo para soldagem via resistência elétrica de compósitos PEI/Fibra de vidro e PEI/Fibra de carbono, entre as interfaces soldadas em relação a corrente de corrosão. Para análise de corrosão será utilizado o método potenciodinâmico de análise de curvas de polarização.

**PALAVRAS-CHAVE:** corrosão; soldagem de compósitos, PEI/Fibra de vidro; PEI/Fibra de carbono

For the development of products and applications in the market it is necessary studies to guarantee the good performance of the materials in their uses. Electrical resistance welding, when applied to polymeric composites, has been presented as a viable alternative for bonding these materials, however, in the processing, it is necessary to use a resistive element (implant) between the welded joints being most often used a stainless steel mesh. After welding the metal mesh becomes a contaminating element making the region propitiates the beginning of corrosion. The aim of this work is to analyze the effect of the stainless steel mesh of the AI 304, used as a resistive element for the electrical resistance of PEI / Fiberglass and PEI / Carbon fiber composites, between the welded interfaces in relation to the corrosion current. For the analysis of corrosion will be used the potentiodynamic method of analysis of polarization curves.

**KEYWORDS:** corrosion; composites welding; PEI/glass fiber; PEI/carbon fiber

## 1. INTRODUÇÃO

Dentro do ramo aeronáutico e espacial, há a necessidade de componentes que tenham baixa massa específica relacionado com elevada resistência mecânica e, nessas características, impulsionando o desenvolvimento de materiais aeroespaciais, destacam-se os compósitos constituídos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas [1].

O poli (éter-imida), ou PEI, é um polímero de alto desempenho, amorfo e com a temperatura de transição vítrea elevada, cerca de 217 °C. Suas características e vantagens pode ser apontadas como: elevada resistência mecânica em temperaturas elevadas; facilidades de manuseio e custo com excelentes propriedades mecânicas; resistência a corrosão; boa resistência química e retardante de chamas e pode ser facilmente amolecido e conformado em larga escala [2,3,4].

As fibras de vidro são utilizadas como materiais de reforço para os compósitos termorrígidos e termoplásticos, pois combina elevada resistência a tração com baixo custo, em relação as fibras de carbono e aramida existentes na indústria. A principal vantagem da incorporação de fibras de vidro em matrizes termoplásticas é o aumento de rigidez do material compósito [5,6].

As fibras de carbono como reforços de compósitos tem importantes aplicações estruturais, com boas propriedades mecânicas e boa resistência a corrosão, destacando-se da fibra de vidro por serem mais leves, terem maior resistência à compressão e à tração [7,8]. Sua facilidade de processamento, possibilidade de obtenção de geometrias complexas e a possibilidade de reciclagem juntamente a uma boa resistência o torna amplamente utilizado e de grande interesse comercial e científico [9].

O processo de soldagem por resistência elétrica aplicado para compósitos poliméricos, consiste no aquecimento das interfaces, por efeito Joule, das partes em decorrência da corrente elétrica passando pela malha metálica (elemento resistivo) entre as interfaces. Com o aquecimento, as interfaces atingem temperaturas acima das de transição vítrea e/ou fusão e suas interfaces se unem [9,10,11].

O fenômeno de polarização e passivação assume um importante papel na cinética dos processos de corrosão eletroquímica, vida útil do material e a determinação da corrente de corrosão [12,13]. O potencial de corrosão pode ser determinado através de um método eletroquímico potenciodinâmico, onde se obtém as curvas de polarização de um certo material a ser estudado em contato com um meio corrosivo para avaliar o potencial de corrosão e determinar sua corrente de corrosão [12,14]. Neste contexto, a proposta deste trabalho é analisar e comparar os efeitos da densidade de corrente de corrosão dos compósitos soldados reforçados com fibra de carbono e nos compósitos soldados reforçados com fibra de vidro, sob influência da malha metálica de aço inox, usado como elemento resistivo para soldagem por resistência elétrica.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Materiais

#### 2.1.1. Laminados Termoplásticos

Para a realização do presente trabalho foram utilizados os laminados PEI/Fibra de vidro e PEI/Fibra de carbono fornecidos pela empresa holandesa TEM CATE *Advanced Composites*. Os laminados foram confeccionados com tecidos nas configurações 8 HS com espessuras nominais de 2 a 3,5 mm, e com configuração (0/90)5s contendo, aproximadamente, 50% em volume de matriz.

#### 2.1.2. Malha Metálica

A malha utilizada como elemento resistivo para a soldagem foi a malha metálica de aço inox AI 304 de 200 mesh em formato de telas. Para realização da soldagem, as malhas foram cortadas nas dimensões de 40 cm de comprimento por 2,5 cm de largura.

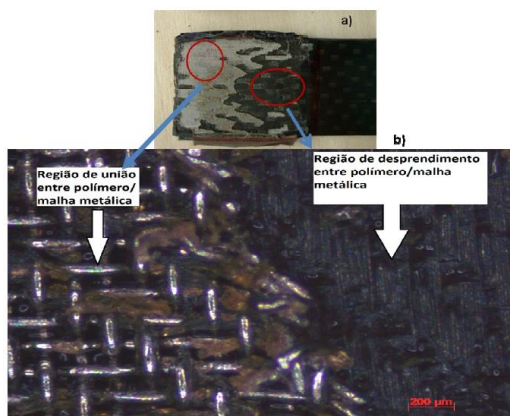
## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Soldagem dos Materiais

O processo de soldagem de compósitos por resistência elétrica consiste na passagem de corrente elétrica por um elemento resistivo, normalmente sendo uma malha metálica ou fibra de carbono, entre duas interfaces dos compósitos sobrepostas ou topo a topo mantidos a uma pressão controlada aplicada. A corrente elétrica que percorre o elemento resistivo gera um aquecimento onde a temperatura gerada pelo efeito Joule na região da interface é aumentada gradativamente ocorrendo a fusão das matrizes poliméricas do compósito diretamente em contato com o elemento resistivo. A união, ou fusão, do PEI ocorre em temperaturas na faixa de 218 a 419 ° C (acima da transição vítrea e abaixo da temperatura de degradação do compósito) [9,15].

### 2.2.2. Ensaio de *Lap Shear*

O ensaio de *lap shear* é um método importante para avaliação da resistência ao cisalhamento e a eficiência da solda nas juntas soldadas de materiais compósitos sendo regido pela norma técnica ASTM D 1002. O ensaio consiste na solicitação de uma carga tracionando o material soldado na seção longitudinal até sua ruptura [9]. A Figura 1 apresenta a amostra de PEI/Fibra de carbono soldado por resistência elétrica após o ensaio de *lap shear*:



**Figura 1.** a) Região da amostrada após o ensaio de *lap shear* contendo o elemento resistivo. b) Ampliação da região soldada apresentando a malha metálica impregnada no compósito PEI/Fibra de carbono [9].

### 2.2.3. Medidas Eletroquímicas

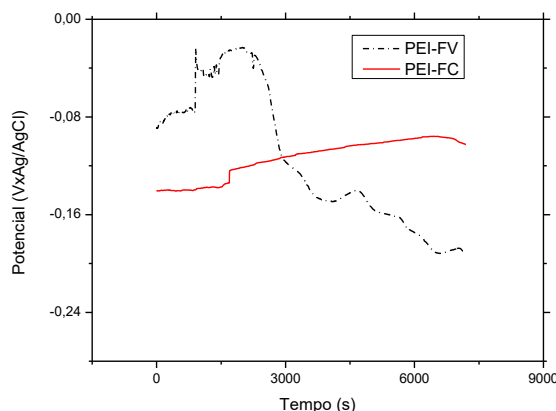
As amostras foram confeccionadas utilizando uma furadeira de bancada com uma serra copo para metais (Ø 19mm), e uma lixadeira rotativa de bancada, de modo que o diâmetro final foi de 14,8mm. Foram realizadas dois tipos de análises: Potencial de Circuito Aberto (OCP) e Curvas de Polarização (CP) (ensaios de corrosão), nas quais, foi utilizado um potenciostato da marca AutoLab, modelo PGSTAT 302N e uma célula eletroquímica convencional contendo um eletrodo de trabalho (amostras PEI/Fibra de carbono ou PEI/Fibra de vidro com área de exposição de 0,8cm<sup>2</sup>); um eletrodo de referência (Ag/AgCl) e dois contra eletrodos (platina). Os experimentos foram conduzidos em temperatura ambiente e em uma solução aerada de NaCl 3,5% (p/p).

Para a realização das curvas de OCP, primeiramente, a amostra foi mantida imersa por 14 horas para a estabilização de sua superfície com a solução eletrolítica. Após este período, foi obtida a curva de potencial de circuito aberto durante 2 horas. As curvas de polarização foram realizadas aplicando-se uma faixa de potenciais de -0,4V a 0,6V ao eletrodo de trabalho com uma taxa de varredura de 0,33 mV/s.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Potencial de Circuito Aberto (OCP)

A Figura 2 apresenta as curvas de potencial de circuito aberto dos compósitos PEI reforçados com fibra de vidro e fibra de carbono nas regiões soldadas.

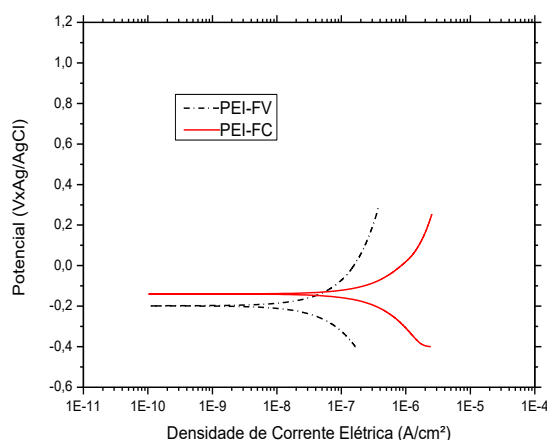


**Figura 2.** Curvas de potencial de circuito aberto PEI/Fibra de vidro (PEI-FV) e PEI/Fibra de carbono (PEI-FC).

Pode ser observado que o compósito reforçado com fibra de vidro apresentou uma variação de seu potencial de estabilização até aproximadamente 3000 s, durante este período, seu potencial foi mais positivo (-0,09V) do que o potencial do compósito com a fibra de carbono (-0,14V). Após 3000 s, o compósito reforçado com fibra de carbono apresentou um potencial de estabilização em torno de -0,10V, mais positivo (nobre) que o potencial do compósito reforçado com fibra de vidro (-0,19V). Neste ensaio, quanto mais positivo for o potencial, uma maior tendência da resistência à corrosão do material pode ser esperada, porém, esta confirmação será obtida na determinação da densidade de corrente de corrosão na próxima análise de curvas de polarização.

#### 3.2. Polarização Potenciodinâmica

A polarização potenciodinâmica é um método baseado em conceitos eletroquímicos que permite determinar a taxa de corrosão e a susceptibilidade à corrosão de materiais específicos em diferentes meios eletrolíticos. Em ambas as curvas, a densidade de corrente da região catódica diminui com o aumento do potencial aplicado, enquanto que para a região anódica, a densidade de corrente aumenta, provocando a corrosão da superfície da amostra. A Figura 3 apresenta as curvas de polarização das juntas soldadas dos compósitos PEI/FV e PEI/FC.



**Figura 3.** Curva de polarização das juntas soldadas dos compósitos PEI/Fibra de carbono (FC) e PEI/Fibra de vidro (FV) com presença da malha metálica.

A Tabela 2 apresenta os valores aproximados da densidade de corrente de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) e do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) das amostras citadas.

**Tabela 1.** Valores de  $i_{\text{corr}}$  e  $E_{\text{corr}}$  dos compósitos PEI/Fibra de vidro e PEI/Fibra de carbono.

Amostra	$I_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{corr}}$ (V)
PEI/Fibra de carbono	$3,19\text{E}^{-7}$	-0,14
PEI/Fibra de vidro	$3,07\text{E}^{-8}$	-0,19

O potencial de corrosão do compósito PEI/FC, -0,14V, é mais positivo (nobre) que o potencial do compósito PEI/FV (-0,19V), este comportamento está de acordo com as curvas de OCP obtidas após 3000s (Figura 2). Porém, a densidade de corrente de corrosão do compósito PEI/FV ( $3,07\text{E}^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>) é quase 6 vezes menor que a do compósito PEI/FC, indicando um aumento da resistência à corrosão de compósitos que utilizam como reforços a fibra de vidro. Apesar da maior densidade de corrente de corrosão do compósito PEI/FC ( $3,19\text{E}^{-7}$ ), este material ainda mantém um baixo valor de densidade de corrente e uma boa resistência à corrosão.

## 5. Conclusões

Os valores obtidos são indicadores do efeito da malha metálica nas uniões soldadas por resistência em elementos estruturais de compósitos PEI reforçado com fibra de vidro e fibra de carbono, caracterizando os pontos de início de corrosão. Assim, é possível estipular o início da degradação por corrosão impactando diretamente nas propriedades das uniões soldadas. Adicionalmente neste trabalho observou-se que o comportamento de corrosão pode sofrer influência de fatores, tais como: a área de exposição da malha metálica impregnada na fibra e sua

distribuição na região de análise após o ensaio *Lap Shear*. Ensaios de corrosão adicionais serão realizados para a verificação da reprodutibilidade destas juntas soldadas.

## 6. Referencias

- [1] REZENDE, M.C.; COSTA, M.L.; BOTELHO, E.C. *Compósitos estruturais - tecnologia e prática*. São Paulo: ArtLibrer, 2011.
- [2] MANO, E.B. *Polímeros como materiais de Engenharia*. São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- [3] MARINUCCI, G. *Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia*. Editora Artlibrer, São Paulo 2011.
- [4] OLIVEIRA, G. H., GUIMARÃES, V. A., BOTELHO, E. C. *Polímeros*, v. 19, p. 305–312, 2009.
- [5] FELTRAN, M.B. *Polímeros*, v. 17, p. 276-283, 2008.
- [6] DA SILVA, R. V. et al. *Matéria*, v. 13, p. 154–161, 2008.
- [7] LI, J.; CAI, C. L. *Cur. Appl. Phy.*, v. 11, p. 50–54, 2011.
- [8] LEBRÃO, G. W. *Rev. Plást. Sul*, v. 91, p. 34-35, 2008.
- [9] ABRAHÃO, A.B.R.M. *Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- [10] PANNEERSELVAM, K.; ARAVINDAN, S.; NOORUL HAQ, A. *Materials & Design*, v. 41, p. 453–459, 2012.
- [11] MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
- [12] NUNES, L. P. *Resistência à corrosão*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2007.
- [13] SAVONOV, G. S. *Implantação iônica por imersão em plasma em materiais metálicos leves*. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.
- [14] WOLYNEC, S. *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*. São Paulo: Editora Edusp, 2013.
- [15] REIS, J. F. *Influência do condicionamento higrotérmico no comportamento mecânico de compósitos soldados de PEI/fibras de carbono*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica Aplicada a Materiais), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.