



# OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR OXIACETILENO PARA COMPÓSITO PEI FIBRA DE CARBONO

I.L.R.Cintra<sup>1, \*</sup>; M.P.S.Ribeiro<sup>1</sup>; L.K. Kurotaki<sup>1</sup>; A. B. R. M. Abrahão<sup>1</sup>; E. C. Botelho<sup>2</sup>; L.F. Marques<sup>2</sup>

1-Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba - Rodovia Vereador Abel Fabricio Dias, 4010 – Pindamonhangaba/SP, CEP: 12.445-010, Brasil. Telefone: (12) 3648-8756, \*Isabelacintra26@gmail.com

2- Unesp, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Departamento de Materiais e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Guaratinguetá/SP, CEP 12.516-540, Brasil. Telefone: (12) 3123-2800.

**RESUMO:** A soldagem em materiais compósitos é algo recente no meio industrial, e vem sendo cada vez mais estudada para a obtenção de melhorias no processo. A soldagem por gás oxiacetileno é um dos processos que vem sendo desenvolvidos devido a seu baixo custo e possibilidade de adaptação para a soldagem. Na soldagem de materiais compósitos a combustão dos gases fornece o calor que, com o auxílio do alumínio para a proteção e transferência, provoca o derretimento e junção da matriz polimérica. Com a utilização do para verificação da eficiência e do planejamento experimental, este trabalho visa a definição dos melhores parâmetros para a otimização na soldagem de materiais compósitos polimérico PEI/Fibra de carbono.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compósitos; PEI; Fibra de Carbono; Soldagem; Oxi-Acetileno.

**ABSTRACT:** The welding in composite material is something new for the industry, and has been increasingly studied to obtain process improvements. The oxyacetylene gas welding is one of the processes that has been developed due the low cost and possibility of adaptation for welding. In the welding of composite materials, the combustion of gases provides the heat which, the use of aluminum for protection and transfer, causes the melting and the polymeric matrix junction. Using the lap shear to verify the efficiency and the experimental planning, this work aims at the definition of the best parameters for optimizations in the welding of polymeric composites PEI/Carbon-Fiber.

**KEYWORDS:** Composite, PEI, Carbon-Fiber, Welding, Oxyacetylene

## 1. INTRODUÇÃO

Os compósitos poliméricos termoplásticos foram introduzidos na indústria aeronáutica na década de 60, substituindo componentes metálicos devido a seu melhor desempenho estrutural, propriedades e economia em peso, diminuindo o peso das aeronaves e melhorando assim seu desempenho (DA COSTA, 2011).

Segundo Souza (2013) os compósitos consistem na união de dois materiais macro constituintes distintos, resultando em um material com propriedades superiores a seus constituintes, porem com uma interface reconhecível para ambos. Eles são constituídos geralmente de fibras como seu material estrutural (vidro, carbono, aramida), e de resina polimérica como a

fase matriz (quase sempre um material termoplástico ou termorrígido) (CALLISTER, RETHWISH, 2016).

A utilização de resinas termorrígidas como matriz (tais como as resinas epóxi e Fenólica) é muito comum, devido a esta garantir uma alta rigidez no produto final (DA COSTA, 2011). Entretanto vem cada vez mais sendo utilizadas resinas termoplásticas para esta aplicação. Em comparação aos termorrígidos convencionais os termoplásticos avançados apresentam vantagens como elevada temperatura de serviço, alta resistência ao impacto, baixo custo, possibilidade de reparos, soldagem e reaproveitamento, entre outros. Vários termoplásticos vêm sendo utilizados atualmente na obtenção de compósitos, como PEEK (poli (éter-éter-cetona)), PEI (poli (éter-imida)), PPS (poli (sulfeto de fenileno)), PSU (polissulfona), entre outros (BATISTA; BOTELHO, 2009).

A PEI é um termoplástico de engenharia que foi desenvolvido pela General Eletrics inc.na década de 70. Trata-se de um polímero amorfo, transparente e de coloração amarelada, que apresenta elevada Temperatura de Transição Vitrea (Tg) (entre 170 a 217°C), elevados valores de resistência e rigidez, e boas propriedades mecânicas como alto modulo elástico e resistência química, além de ser um material isolante que pode apresentar valores de resistividade elétrica da ordem 10<sup>17</sup> Ω/cm (REIS,2016; ALEXANDRINO, 2012).

Em comparação as outras a fibra de carbono é a mais utilizadas como reforço em materiais compósitos poliméricos, destacando-se por apresentar elevado coeficiente de expansão térmica, estabilidade térmica quando submetida a temperaturas elevadas, e elevada resistência a corrosão e rigidez, o que a torna os compósitos reforçados com fibra de carbono um ótimo substituto para metais, ligas e outros materiais (FARIA, 2008).

Geralmente, o desenvolvimento de uma estrutura deve ser feito de forma que não haja a existência de uniões, pois estas podem causar fragilidade e diminuição do desempenho do material. Entretanto muitas vezes é necessária a utilização de conexões devido a limitações no processo de fabricação, montagem, reparo e inspeção (DA COSTA, 2011). SegundoSouza (2013) as técnicas de união de compósitos podem ser classificadas por fixação mecânica, união adesiva e união por fusão (soldagem). No entanto, devido a uma melhor qualidade nas juntas e menor tempo em comparação aos outros, o processo de união por soldagem vem apresentando grande potencial para montagem, união e reparo dos componentes destes materiais (ABRAHAO, 2015).

São denominados processos por oxigás (OFW) aqueles que utilizam como meio de calor a combustão de um gás combustível juntamente com o oxigênio. O processo utiliza proporções controladas dos dois gases, a chama produzida por um maçarico, e pode ou não usar material de adição. Podem ser citados como vantagens para a utilização da soldagem oxiacetileno a possibilidade de controle do calor e temperatura sobre o material, e o baixo custo e versatilidade do equipamento para a soldagem (BRACARENSE, 2000).

O objetivo deste trabalho foi a otimização do processo oxiacetileno para a soldagem do compósito PEI/Fibra de Carbono, com a otimização dos parâmetros distância da chama e tempo para obtenção de maior valor de resistência mecânica dada pelo ensaio de Lap Shear.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Laminados

Neste trabalho foram utilizados os compósitos termoplásticos PEI/ fibra de carbono, processados e fabricados pela empresa holandesa TENCATE AdvancedComposites.

### 2.2 Soldagem por Oxiacetileno

Para a soldagem foi utilizado o conjunto de cilindros Oxiacetileno, apresentado na figura 1, utilizando a chama neutra com vazões de 1,0 kgf/cm<sup>3</sup> de acetileno e de 0,5 kgf/cm<sup>3</sup> de oxigênio.



**Figura 1.** Conjunto utilizado para a soldagem oxiacetileno.

Durante o processo de soldagem de materiais compósitos é de grande importância manter o controle da temperatura, sendo utilizado para este fim um pirômetro óptico, de marca INSTRUTHERM. Para a realização da soldagem as amostras foram posicionadas e fixadas em um dispositivo que consiste em dois tijolos refratários mostrado na figura 2 possuindo dois orifícios para a passagem da chama.

É utilizado a liga de alumínio 2024 como condutor térmico para impedir a degradação do compósito pela chama, onde ele é inserido no orifício do tijolo e as amostras são alocadas em cima destes através dos rasgos presente nos tijolos. Os tijolos refratários apresentando dois furos para passagem da chama como mostrado na figura 2.



**Figura 2.** Dispositivo utilizado na soldagem

### 2.3Lap Shear

É atualmente o teste mais utilizado para a análise da resistência a ruptura de juntas soldadas de materiais compósitos. O teste consiste na aplicação de uma força de tração até a ruptura do material. Os ensaios foram realizados em uma máquina de tração da marca KRATOS, série 2.000 Kgf, mostrada na figura 3, baseando-se na norma ASTM D1002-10.



**Figura 3.**Máquina utilizada para realização do ensaio *Lap Shear*.

## 2.4 Análise Microscópica

Para a análise microscópica as amostras rompidas que apresentaram maior e menor valor de resistência mecânica foram embutidas em resina acrílica do tipo RPI e permaneceram em repouso até a cura. Em seguida as amostras receberam lixamento nas lixas de granulometria 320, 1200 e 2000mesh, para em seguida ser realizado o polimento com pasta de diamante de 3  $\mu\text{m}$ . Através do microscópio ótico foi caracterizada a área soldada, com ampliação de 50x.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Planejamento Experimental

No desenvolvimento do planejamento experimental foram utilizadas as condições mínimas (40mm e 40s) e máximas (60mm e 60s) das variáveis tempo e distância na soldagem do compósito polimérico PEI/Fibra de carbono, sendo estas definidas por Santos e Carvalho (2018), apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1-** Parâmetros mínimos e máximos utilizados na soldagem do PEI/Fibra de carbono pelo processo oxiacetileno

Tempo mínimo	Tempo máximo	Altura mínima	Altura máxima
40s	60s	4 cm	6 cm

**Fonte:** (SANTOS; CARVALHO, 2018).

Para a otimização do processo foi utilizado o planejamento experimental Central Composite Design (CCD) e o experimento fatorial completo, onde foram analisadas a influência das variáveis de entrada nos resultados obtidos no processo. Foi utilizado o fatorial completo  $2^2$ , com dois níveis e duas variáveis (tempo e distancia), utilizando um design com determinado número de pontos

centrais e axiais (pontos abaixo e acima dos níveis determinados). Neste trabalho foram analisadas 4 replicatas do ponto central e 8 replicatas dos pontos axiais, sendo que em um CCD os pontos axiais totalizam o dobro do número de fatores envolvidos no experimento, ou seja,  $2 \times 2 = 4$ . A Tabela 2 apresenta a matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (LapShear) obtidos nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/fibra de carbono. Os valores obtidos encontram-se na faixa de 2,8 a 15,2 Mpa, destacando-se o valor encontrado no teste 4.

**Tabela 2-** Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (*LapShear*).

Testes	Distancia (mm)	Tempo (s)	Lap Shaer(MPa)
1	50.00	64.14	2,8
2	50.00	50.00	15,55
3	60.00	40.00	7
4	50.00	50.00	15,205
5	40.00	40.00	12,05
6	35.86	50.00	2,17
7	40.00	60.00	7,37
8	60.00	60.00	14,92
9	50.00	35.86	6,71
10	64.14	50.00	7,1
11	50.00	50.00	13,745
12	50.00	50.00	9,865

Com base nos resultados obtidos dos ensaios com a variável resposta (Lap Shear), foi possível utilizando o programa estatístico analisar as variáveis significativas deste processo. Os resultados obtidos serão analisados com o programa Design-Expert 6.0 (Stat-Ease Corporation, USA) que através da análise de variância (ANOVA), foi possível determinar quais fatores influenciam ou não na resposta do processo.

**Tabela 3-** Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem do compósito PEI/fibra de carbono.

Fator	Soma Quadrática	F	"Prob> F"
Modelo	204.10	6,70	0,0192
A	4.36	0,72	0,4299
B	1,37	0,23	0,6518
A <sup>2</sup>	7.69	1,26	0,3041
B <sup>2</sup>	153.12	25,14	0,0024
AB	45.16	7,41	0,0345
Erro residual	36.54		
Falta de ajuste	24.78	2,11	
Erro Puro	11.76		
R <sup>2</sup>	240.65		

Os valores de "Prob> F" inferiores a 0,0500 indicam que os termos do modelo são significativos e valores maiores que 0,1000 indicam que os termos do modelo não são significativos. Neste estudo deste processo com o material avaliado, os termos de tempo quadrático, tempo e distância da chama e o modelo foram significativos como apontados pela Tabela 3. Sendo que avaliando-se em termos de processo isto significa que somente mudando os valores isoladamente de tempo ou distância da chama não haverá alteração da resistência mecânica da junta. Adicionalmente pelos resultados da variância (ANOVA) verificou-se que o modelo estatístico proposto é significativo, representando satisfatoriamente o processo para o material em um nível de significância de 95%.

### 3.2 Otimização do processo de soldagem

Ainda por meio dos resultados obtidos na análise de variância (ANOVA) foi possível construir o modelo estatístico incluindo os coeficientes dos parâmetros significativos para o processo de soldagem. A equação 1 mostra o modelo obtido.

$$\text{LapShear} = +14,84 - 4,89B^2 + 3,36 A \cdot B \quad (1)$$

Onde: A= distancia da chama; B= tempo de soldagem

Para a estimativa dos coeficientes definidos pela equação 1, geralmente se utiliza o método dos mínimos quadrados (OLS), que busca definir o melhor ajuste para um conjunto de dados buscando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados

observados. Dessa forma é construída uma função que associa as respostas com as variáveis do processo. Utilizando o programa Design-Expert, foi obtido os valores máximos de resistência dentro das variáveis estudadas, com isso foi construído gráficos de superfície de resposta referentes aos valores de variáveis buscando-se os maiores valores de Lap Shear. As Figuras 4 e 5 mostram as superfícies de resposta com as regiões de otimização.

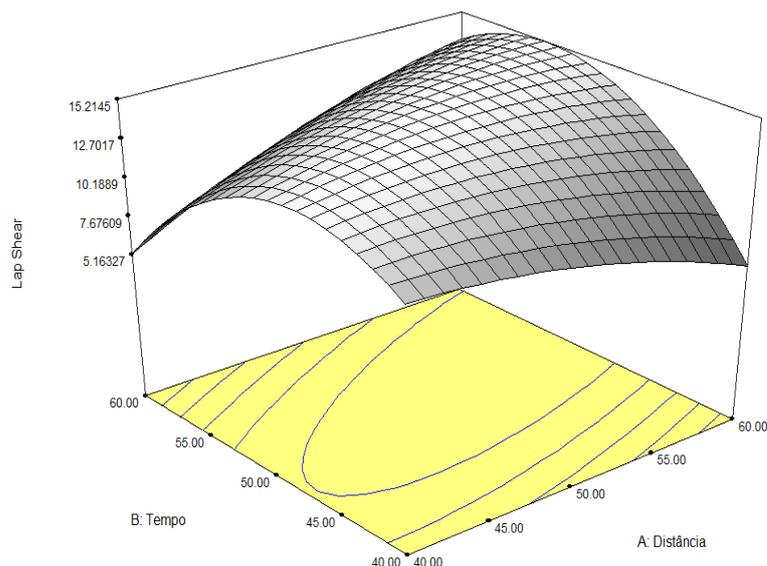


Figura 4. Superfície de resposta.

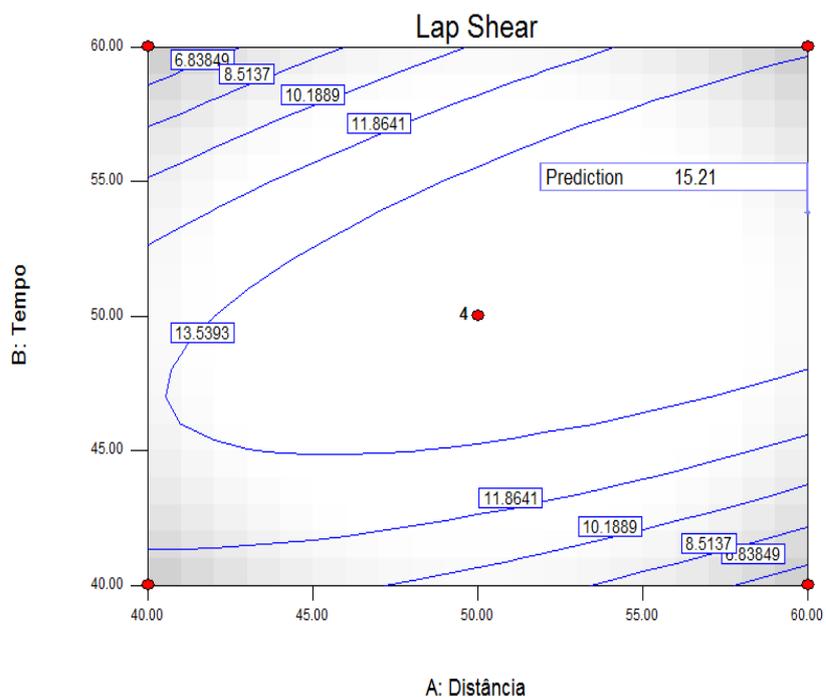
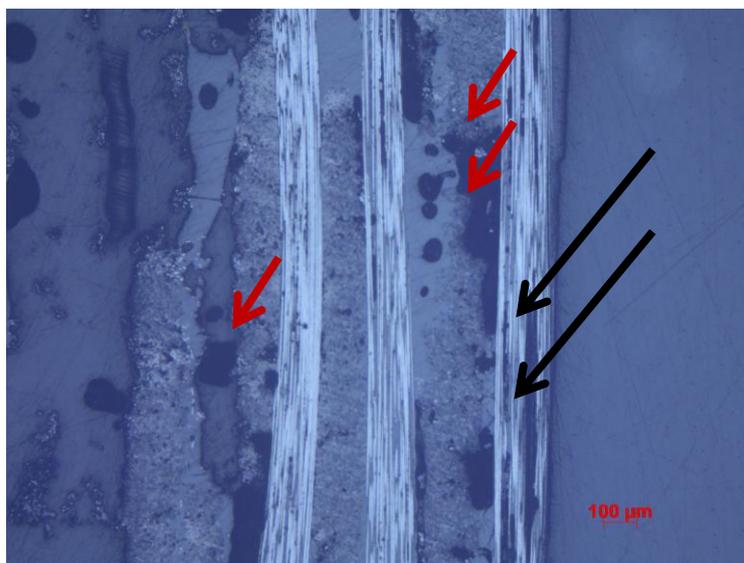


Figura 5. Curvas de nível para o compósito PEI/Fibra de carbono.

Pela análise das curvas de nível e superfície de resposta pode-se sugerir dentro dos cálculos estatísticos realizados pelo programa, que o modelo proposto apontou um valor predito máximo dentro das faixas e condições estudadas de 15,21 Mpa de valor de resistência para junta, sendo que as condições para soldagem otimizadas de 60mm de distância da chama e 54 segundos de tempo.

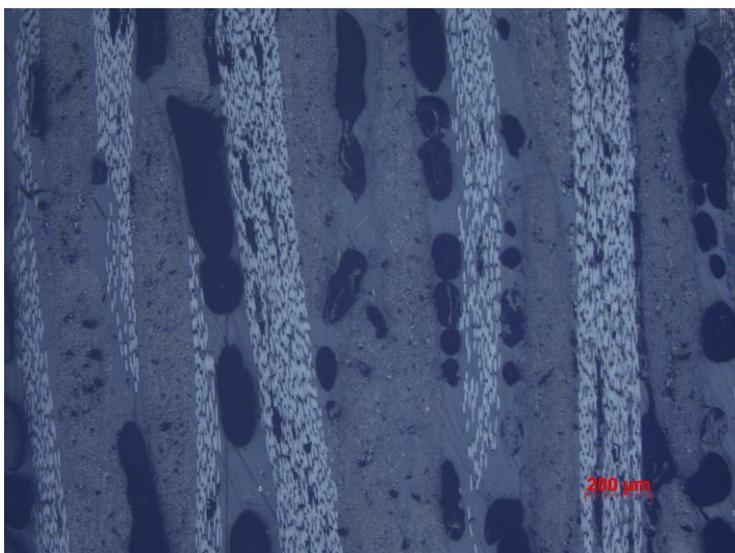
### 3.3 Caracterizações das amostras fraturadas

As falhas em materiais compósitos podem ser determinadas pelos danos que ocorrem na fratura, que podem ser definidos como quebra das fibras, trinca da matriz ou delaminação interlaminar. Os tipos de danos causados são diretamente ligados a orientação das fibras do compósito e a aplicação da carga do ensaio. As fraturas podem ser definidas em três tipos: a interlaminar, que consiste na interação entre as partes soldadas; a interfacial, que ocorre entre o elemento resistivo e o laminado (REZENDE, 2007). As amostras com menor e maior valor obtidos no ensaio de Lap Shear foram analisadas através da microscopia óptica. A Figura 6 apresenta a microestrutura da amostra soldada nos parâmetros 50 mm e 64 s, sendo esta a que apresentou menor valor de resistência mecânica.



**Figura 6.** Microscopia óptica da amostra soldada fraturada com menor valor de resistência mecânica obtido com ampliação de 50 X.

Na imagem (Figura 6) foi possível observar a presença de vazios representados pelas setas vermelhas, devido o descolamento da resina após o ensaio mecânico; na amostra também pode ser observado regiões de rompimento das fibras (setas pretas), estes sendo causados pela alta temperatura que resultou na degradação do material polimérico atingindo as fibras. A Figura 7 apresenta a microestrutura da amostra que apresentou maior valor de resistência, sendo esta soldada nos parâmetros 50 mm e 50 s. Na Figura 7 evidencia maior quantidade de vazios na região polimérica (matriz do material compósito) o que explica maior resistência mecânica obtida devido não haver muita degradação da fibra. Adicionalmente que pode ser comprovado por menores áreas de vazios apresentados na região da fibra.



**Figura 7.** Microscopia óptica da amostra que apresentou maior valor de resistência obtido com ampliação de 50x.

#### 4. CONCLUSÃO

Através do planejamento experimental e da análise de variância foi possível determinar as melhores condições para a soldagem do compósito PEI-Fibra de Carbono pelo processo oxiacetileno. Após o ensaio Lap Shear as juntas rompidas que apresentaram maior e menor valor de resistência mecânica foram caracterizadas através da microscopia óptica, onde se observou na amostra de menor resistência o rompimento da fibra devido à degradação do material polimérico. Entretanto, na amostra que apresentou maior valor de resistência observou-se maior quantidade de vazios na matriz polimérica e não haver muita degradação da fibra.

#### REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, A. B. R. M. *Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas*. 2015. 200f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

ALEXANDRINO, E. M. *Compósitos poliméricos de poli (éter imida) / polianilina: preparação e caracterização*. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

BATISTA, N.L.; BOTELHO, E.C. Influência do intemperismo no desempenho viscoelástico de laminados pei/fibras de Carbono com aplicações aeroespaciais. Congresso Brasileiro de polímeros, 2009, Iguaçú.

BRACARENSE, A. Q. *Processo de Soldagem com chama Oxi-gás – OFW*. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte, 2000.

CARVALHO, T. P. ; OLIVEIRA, V. S., *Desenvolvimento E Otimização Do Processo De Soldagem Por Oxiacetileno Para Compósito Pei Fibra De Vidro*. 2018. 50 f. TCC (Graduação) -



Curso de Tecnologia Mecânica: Processos de Soldagem, Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, 2018.

DA COSTA, A.P. *Efeito do condicionamento ambiental em compósitos soldados de PPS/Fibras contínuas*. 2011. 134f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica- Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

CALLISTER, W. D. ; RETHWISH D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 9ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

REIS, J. F.. *Influência do condicionamento higrotérmico no comportamento mecânico de compósitos soldados de PEI/fibras de carbono*. 2016. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016

REZENDE, M. C. *Fractografia de Compósitos Estruturais. Polímeros: Ciência e Tecnologia*. São José dos Campos. Vol 17, nº 3. 2007. Disponível em :<<http://www.scielo.br/pdf/po/v17n3/003.pdf>>. Acesso em 24 fev 2007.

SANTOS, B. A. dos; CARVALHO, J. A.. *Estudo Dos Parâmetros Para Soldagem Do Compósito Pei- Fibra De Carbono Pelo Processo Oxiacetileno*. 2018. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia Mecânica: Processos de Soldagem, Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, 2018.

SOUZA, S.D.B. *Avaliação dos parâmetros de soldagem por resistência para compósitos de PPS/Fibras contínuas com aplicações aeronáuticas*. 2013. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica- Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013