Otimização do processo de soldagem por oxiacetileno para compósito PEI/fibra de carbono

Optimization of the oxycetylene welding process for PEI/fiber carbon compound

Isabela Luiza Rodrigues Cintra^{1*}, Marcos Paulo Souza Ribeiro¹, Larissa Kaori Kurotaki¹, Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão¹, Edson Cocchieri Botelho², Luiz Felipe Marques²

RESUMO

A soldagem em materiais compósitos é recente no meio industrial e vem sendo cada vez mais estudada para obtenção de melhorias no processo. A soldagem por gás oxiacetileno é um dos processos desenvolvidos para a soldagem devido a seu baixo custo e possibilidade de adaptação. Na soldagem de materiais compósitos, a combustão dos gases fornece o calor que, com o auxílio do alumínio para proteção e transferência, provoca o derretimento e a junção da matriz polimérica. Por meio do planejamento experimental, este trabalho busca a definição dos melhores parâmetros para otimização na soldagem de materiais compósitos poliméricos PEI/fibra de carbono por meio da soldagem por oxiacetileno. Foram definidos como parâmetros de avaliação da soldagem o ensaio de lap shear e microscopia ótica. Os parâmetros de maior lap shear (15,55 MPa) foram conseguidos com um tempo de 54 s e distancia de chama de 60 mm.

Palavras-chave: Compósitos, PEI, Fibra de Carbono, Soldagem, Oxiacetileno

ABSTRACT

Welding in composite materials is recent in the industrial environment, and has been increasingly studied for improvements in the process. Oxyacetylene gas welding is one of the processes developed for welding due to its low cost and the possibility of adaptation. In the welding of composite materials the combustion of the gases provides the heat which, with the aid of aluminum for the protection and transfer, causes the melting and junction of the polymeric matrix. Throughout the experimental planning, this work seeks to define the best parameters for the optimization of the PEI/Carbon fiber composite materials by oxyacetylene welding. The Lap Shear test and optical microscopy were defined as welding evaluation parameters. The highest lap shear parameters (15.55 MPa) were achieved with a time of 54 and a flame distance of 60 mm.

Keywords: Composite, PEI, Carbon Fiber, Welding, Oxyacetylene

Recebido: 31 Jan. 2019 | Aprovado: 21 Mar. 2019

^{1.}Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba – Pindamonhangaba/SP – Brasil.

^{2.}Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Departamento de Materiais e Tecnologia – Guaratinguetá/SP – Brasil. **Autor correspondente:** isabelacintra26@gmail.com

INTRODUÇÃO

Os compósitos poliméricos termoplásticos foram introduzidos na indústria aeronáutica na década de 1960, substituindo componentes metálicos devido a seu melhor desempenho estrutural, propriedades como baixa densidade, elevada resistência mecânica e economia em peso, diminuindo o peso das aeronaves e melhorando, assim, seu desempenho¹.

Segundo Souza², os compósitos consistem na união de dois materiais macroconstituintes distintos, resultando em um material com propriedades superiores a seus constituintes, porém com interface reconhecível para ambos. 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)³.

A utilização de resinas termorrígidas como matriz (tais como as resinas epóxi e fenólica) é muito comum, devido a essas garantirem alta rigidez no produto final¹, Entretanto, cada vez mais a resina termoplástica para essa aplicação vem sendo utilizada. 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 têm sido utilizados atualmente na obtenção de compósitos, como o poli (éter-éter-cetona) (PEEK), a poli (éter-imida) (PEI), o poli (sulfeto de fenileno) (PPS), a polissulfona (PSU), entre outros⁴.

A PEI é um termoplástico de engenharia desenvolvido pela General Electrics Inc. na década de 1970. Trata-se de um polímero amorfo, transparente e de coloração amarelada que apresenta elevada temperatura de transição vitrea (Tg) (entre 170 a 217 °C), levados valores de resistência e rigidez e boas propriedades mecânicas, como alto módulo elástico e resistência química, além de ser um material isolante que pode apresentar valores de resistividade elétrica da ordem de 1.017 Ω/cm^{5,6}.

Em comparação a outros reforços, a fibra de carbono é a mais utilizada 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 à corrosão e rigidez, o que torna os compósitos reforçados com fibra de carbono um ótimo substituto para metais, ligas e outros materiais⁷.

Geralmente, o desenvolvimento de uma estrutura deve ser feito de forma que não haja uniões, pois essas 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 inspeção¹. Segundo Souza², as técnicas de união de compósitos podem ser classificadas por fixação mecânica, união adesiva e união por fusão (soldagem). No entanto, devido à 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 desses materiais⁴.

São denominados processos por oxigás (oxy fuel welding – 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 soldagem⁸.

O objetivo deste trabalho foi a otimização do processo oxiacetileno para soldagem do compósito PEI\fibra de carbono, com otimização dos parâmetros distância da chama e tempo para obtenção de maior valor de resistência mecânica dada pelo ensaio de *lap shear*.

MATERIAIS E MÉTODOS Laminados

Neste trabalho foram utilizados os compósitos termoplásticos PEI/fibra de carbono nas dimensões $100\,\mathrm{mm}\times25\,\mathrm{mm}$, processados e fabricados pela empresa holandesa TenCate Advanced Composites.

Soldagem por Oxiacetileno

Para soldagem, utilizou-se o conjunto de cilindros oxiacetileno com a chama neutra com vazões de 1,0 kgf\cm³ de acetileno e de 0,5 kgf\cm³ de oxigênio.

Durante o processo de soldagem de materiais compósitos, é de grande importância manter o controle da temperatura, sendo utilizado, para esse fim, um pirômetro óptico da marca Instrutherm. Para realização da soldagem, as amostras foram posicionadas e fixadas em um dispositivo que consiste em dois tijolos refratários (Fig. 1) que contêm dois orifícios para passagem da chama.



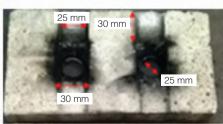




Figura 1: Dispositivo utilizado na soldagem com dimensões.

Para que não haja degradação do material compósito devido à chama, utiliza-se a liga de alumínio 2024 como protetor e condutor térmico, sendo essa inserida entre a amostra e os orifícios circulares. Na Fig. 2 são apresentados os corpos de prova já soldados.



Figura 2: Corpos de Prova soldados do material compósito PEI/ fibra de carbono.

Lap Shear

O teste *lap shear* é atualmente o mais utilizado para análise da resistência à 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, baseando-se na norma ASTM D1002-10.

Análise Microscópica

Para 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, 1.200 e 2.000 mesh para, em seguida, ser realizado o polimento com pasta de diamante de 3 μm. Por meio do microscópio óptico, caracterizou-se a área soldada, com ampliação de 50X.

RESULTADOS E DISCUSSÕES Planejamento Experimental

No planejamento experimental, utilizaram-se as condições mínimas (40 mm e 40 s) e máximas (60 mm e 60 s) das variáveis tempo e distância na soldagem do compósito polimérico PEI/fibra de carbono, sendo essas definidas por Santos e Carvalho⁸ e apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros mínimos e máximos utilizados na soldagem do PEI/fibra de carbono pelo processo oxiacetileno.

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

Fonte: Santos e Carvalho9.

Para otimização do processo, utilizou-se o planejamento experimental *central composite design* (CCD) e o experimento fatorial completo, no qual foi analisada a influência das variáveis de entrada nos resultados obtidos no processo. Utilizou-se o fatorial completo 2^2 , com dois níveis e duas variáveis (tempo e distância) e design com determinado número de pontos centrais e axiais (pontos abaixo e acima dos níveis determinados). Neste trabalho, analisaram-se quatro replicatas do ponto central e oito 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 (*lap shear*) obtidos nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/fibra de carbono. Os valores obtidos encontramse na faixa de 2,8 a 15,55 MPa, destacando-se o valor encontrado no teste 2.

Tabela 2: Matriz experimental e resultados de tensão de ruptura (*lap shear*).

Testes	Distância (mm)	Tempo (s)	Lap shear (MPa)
1	50.00	64.14	2,80
2	50.00	50.00	15,55
3	60.00	40.00	7,00
4	50.00	50.00	15,20
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	7,10
11	50.00	50.00	13, 74
12	50.00	50.00	9,86

Com base nos resultados obtidos dos ensaios com a variável resposta (*lap shear*), foi possível, utilizando o programa estatístico, analisar as variáveis significativas desse processo. Os resultados obtidos são analisados com o programa Design-Expert® 6.0 (Stat-Ease Corporation, USA) e, por meio da análise de variância (*analysis of variance* – ANOVA), determinou-se quais fatores influenciam ou não na resposta do processo. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Os valores de Prob > F apresentados, inferiores a 0,0500, indicam que os termos do modelo são significativos, e os valores maiores que 0,1000 indicam que os termos do modelo não são significativos. De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, observa-se que, no estudo desse processo com o material avaliado, a variação dos fatores tempo de soldagem e distância da chama isoladamente não causa alteração na resistência mecânica da junta, sendo então significativas para o processo a variação dos fatores

juntamente e a variação dos fatores ao quadrado. Adicionalmente, pelos resultados da ANOVA, verificou-se que o modelo estatístico proposto é significativo, representando satisfatoriamente o processo para o material em um nível de significância de 95%.

Tabela 3: 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
Α	4.36	0,72	0,4299
В	1.37	0,23	0,6518
A ²	7.69	1,26	0,3041
B2	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		
R2	240.65		

(A) distância da chama; (B) tempo de soldagem.

Otimização do Processo de Soldagem

Ainda por meio dos resultados obtidos na ANOVA, construiuse o modelo estatístico incluindo os coeficientes dos parâmetros significativos para o processo de soldagem. Na Eq. 1 é mostrado o modelo obtido,

$$Lap shear = +14,84 - 4,89 B^2 + 3,36 A.B$$
 (1)

onde A é a distância da chama e B é o tempo de soldagem.

Para estimativa dos coeficientes definidos pela Eq. 1, geralmente se utiliza o método dos mínimos quadrados (*ordinary least squares* – OLS), que busca definir o melhor ajuste para um conjunto de dados, procurando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados. Dessa forma, constrói-se uma função que associa as respostas com as variáveis do processo. Utilizando o programa Design-Expert, obtiveram-se os valores máximos de resistência nas variáveis estudadas; com isso, construíram-se gráficos de superfície de resposta referentes aos valores de variáveis, buscando-se os maiores valores de *lap shear*. As Figs. 3 e 4 mostram as superfícies de resposta com as regiões de otimização.

Pela análise das curvas de nível e superfície de resposta, podese sugerir, conforme os 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 as condições para soldagem otimizadas de 60 mm de distância da chama e 54 s de tempo, sendo esses parâmetros não comprovados neste trabalho devido ao pouco tempo disponível.

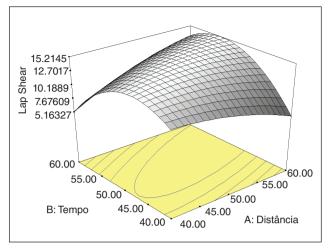


Figura 3: Superfície de resposta.

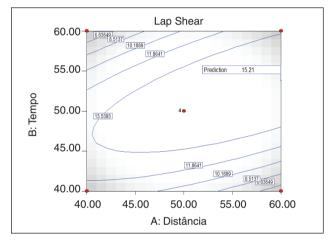


Figura 4: Curvas de nível para o compósito PEI/fibra de carbono.

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 à orientação das fibras do compósito e à 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; e na amostra, que ocorre no material em si fora da área soldada^{2,10}.

Para análise de microscopia óptica, utilizou-se a amostra soldada com os parâmetros que apresentaram o maior valor real de resistência na junta (50 mm e 50 s), 15,55 MPa, e a amostra soldada nos parâmetros que apresentaram o menor valor de resistência (50 mm e 64 s), de 2,8 MPa. Tendo ambas as amostras apresentado fratura do tipo interlaminar. A Fig. 5 apresenta a microestrutura da amostra soldada nos parâmetros 50 mm e 64 s, sendo essa a que apresentou menor valor de resistência mecânica.

Na imagem, observa-se a presença de vazios indicados pelas setas vermelhas, devido ao descolamento da resina após o ensaio mecânico; na amostra, também podem ser observadas regiões de rompimento das fibras (setas pretas), causado pela alta temperatura, que resultou na degradação do material polimérico, atingindo as fibras. A Fig. 6 apresenta a microestrutura da amostra que apresentou maior valor de resistência, sendo essa soldada nos parâmetros 50 mm e 50 s.

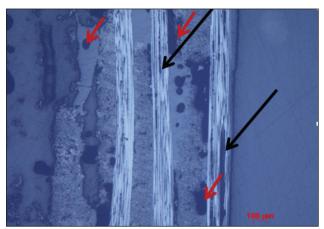


Figura 5: Microscopia óptica da amostra soldada fraturada com menor valor de resistência mecânica obtido com ampliação de 50X.

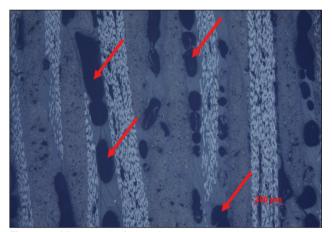


Figura 6: Microscopia óptica da amostra que apresentou maior valor de resistência obtido com ampliação de 50X.

A Fig. 6 evidencia maior quantidade de vazios na região polimérica (matriz do material compósito), indicados pelas setas vermelhas, o que explica maior resistência mecânica obtida por não haver muita degradação da fibra, que pode ser comprovada por menores áreas de vazios apresentados na região da fibra.

CONCLUSÃO

Por meio do planejamento experimental e da ANOVA, foi possível determinar as melhores condições para soldagem do

compósito PEI/fibra de carbono pelo processo oxiacetileno. Após o ensaio *lap shear*, as juntas soldadas nos parâmetros reais que apresentaram maior valor e menor valor de resistência mecânica foram caracterizadas por meio da microscopia ótica, na qual 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, observaram-se maior quantidade de vazios na matriz polimérica e pouca degradação da fibra.

REFERÊNCIAS

- Costa AP da. Efeito do condicionamento ambiental em compósitos soldados de PPS/fibras contínuas [dissertação]. Guaratinguetá (SP): Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista; 2011.
- Souza SDB. Avaliação dos parâmetros de soldagem por resistência para compósitos de PPS/fibras contínuas com aplicações aeronáuticas [dissertação]. Guaratinguetá (SP): Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista; 2013.
- Callister WD, Rethwish DG. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9a ed9aed. Rio de Janeiro: LTC; 2016.
- Abrahão ABRM. Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas [dissertação]. Guaratinguetá (SP): Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista; 2015.
- Reis JF. Influência do condicionamento higrotérmico no comportamento mecânico de compósitos soldados de PEl/fibras de carbono [dissertação]. Guaratinguetá (SP): Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista; 2016.
- Alexandrino EM. Compósitos poliméricos de poli (éter imida)/ polianilina: preparação e caracterização [dissertação]. Campinas (SP): Curso de Química, Universidade Estadual de Campinas: 2012.
- Faria MCM. Avaliação do efeito higrotérmico nas propriedades mecânicas de compósitos de PPS/fibras contínuas [dissertação]. Guaratinguetá (SP): Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá; 2008.
- Bracarense AQ. Processo de soldagem com chama oxi-gás OFW [tese]. Belo Horizonte (MG): Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais; 2000.
- Santos BA dos, Carvalho JA. Estudo dos parâmetros para soldagem do compósito PEI- fibra de carbono pelo processo oxiacetileno [trabalho de conclusão de curso]. Pindamonhangaba (SP): Curso de Tecnologia Mecânica, Processos de Soldagem, Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba; 2018.
- Rezende MC. Fractografia de compósitos estruturais. Polímeros. 2017;17(3):E4-11. https://doi.org/10.1590/S0104-14282007000300003