



ESTUDO DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE COMPÓSITO PEI/FIBRA DE VIDRO POR PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

ABRAHÃO, A. B. R. M^{1,2*}; REIS, J. F¹.; OLIVEIRA, P. B. W.¹; MARQUES, L. F^{1,2}.; COSTA, M. L¹.; BOTELHO, E. C¹.

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

*ana.abrahao@fatec.sp.gov.br

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.

*jonasfrankreis@gmail.com

RESUMO: As utilizações de compósitos poliméricos avançados termoplásticos na indústria aeroespacial vêm ganhando grande destaque devido ao avanço tecnológico e pelas atrativas características como: elevada resistência mecânica e rigidez aliadas á baixa massa específica. Estudos recentes mostram que a técnica de soldagem por resistência elétrica é um dos processos mais promissores para união de compósitos termoplásticos, trata-se de um método rápido, pois necessita de pouco preparo de superfície. Os principais parâmetros que influenciam neste tipo de soldagem são a corrente elétrica, o tempo e a pressão, por isto é interessante fazer um estudo destas variáveis. Neste sentido a proposta deste trabalho, é o estudo destas três variáveis utilizando o planejamento experimental fatorial 2^3 , na soldagem por resistência para laminados de polieterimida (PEI) reforçados com fibras contínuas de vidro utilizando como elemento resistivo a malha de aço inox de 400 mesh.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos; Soldagem por Resistência; PEI; Fibras de Vidro.

ABSTRACT: The use of advanced thermoplastic polymeric composites are becoming increasingly important in the aeronautical industry as a result of technological advancement and their attractive features such as high strength and stiffness combined with the low density. Recent studies demonstrate that the technique of electrical resistance welding is one of the most promising for bonding composites, as a rapid method because it does not require much surface preparation. The main parameters that influence this type of welding system is the electric current, time and pressure, so it is interesting to do a study of these variables. In this context, the proposal of this work is the study of these three variables using factorial design 2^3 for laminates polyetherimide (PEI) reinforced with continuous glass fibers using as a resistive element a mesh of stainless steel of 400 mesh..

KEYWORDS: Composites; Resistance Welding; PEI; Glass Fibers.

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas vêm sendo estudados em uma ampla variedade de aplicações desde as comerciais, com baixo custo envolvido, até as de engenharia, com maior valor agregado. Estudos nos últimos anos estão sendo direcionados em compósitos termoplásticos como alternativa a compósitos termorrígidos em algumas aplicações aeronáuticas, devido ao ganho em algumas propriedades [1,2].

Um dos problemas principais de utilização de compósitos poliméricos em aplicações estruturais consiste em sua união efetiva para a integração de componentes. Neste sentido, estudos recentes mostram que a técnica de soldagem por resistência elétrica (aquecimento da área de junção por efeito Joule) são eficientes para união desses materiais [3].

Entre os polímeros termoplásticos utilizados como matriz para compósitos destaca-se o poli (éter-imida) (PEI), pois este apresenta características de elevados valores de resistência e rigidez em elevadas temperaturas e apresenta propriedades elétricas e resistência química. Este polímero ainda apresenta características como boa resistência a ácidos e boa tolerância a bases, absorve pouca água e apresenta resistência a radiação ultravioleta e gama [5].

A união por fusão ou soldagem é uma das técnicas que apresenta maior potencial para aplicação em montagem, junção e reparo dos componentes destes materiais além de apresentar uma série de vantagens em relação a outras formas de união. A soldagem é a técnica mais vantajosa para a união das peças e reparo de compósitos, pois este método gera a união com qualidade superior em comparação com as outras técnicas disponíveis (união mecânica e união adesiva), sendo necessária pouca preparação da superfície a ser soldada (limpeza com álcool isopropílico) e ser um processo rápido [3]. Dentre os processos de soldagem disponíveis podemos citar a soldagem por vibração, laser, indução, resistência elétrica, alta frequência e ultrassônica. Todas as técnicas disponíveis para a soldagem de compósitos termoplásticos são adaptáveis para automação para inspeção online. Além disso, estas técnicas fornecem reprodutibilidade e necessitam de um mínimo de preparo de superfície diminuindo, desta forma, o custo do processo. Portanto, a soldagem é um processo muito atrativo para união de compósitos de matriz termoplástica, por ser um processo rápido e simples, em que a união das peças é adquirida pela fusão e consolidação na região interfacial das partes a serem soldadas. As técnicas de união por fusão podem ser classificadas de acordo com a tecnologia utilizada para gerar o aquecimento. [1,3].

A soldagem por resistência elétrica aplicada a compósitos termoplásticos tem um grande potencial para a integração de compósitos termoplásticos de alto desempenho, especialmente quando se trata de aplicações aeroespaciais. Entretanto, parâmetros como isolamento térmico, entrada de energia, tempo de soldagem, orientação da fibra, e o tipo de elemento resistivo a ser utilizado vem sendo estudados para melhoria da qualidade e desempenho das juntas soldadas [3].

A resolução de um problema por meio de um planejamento estatístico conhecido como o planejamento experimental fatorial é utilizado para solução de um projeto experimental, usando de um número menor de medidas, mas que ao mesmo tempo consegue-se explorar todo o espaço experimental de interesse. Relacionado a trabalhar-se com 2 ou 3 variáveis independentes ou fatores, recomenda-se um delineamento composto central rotacional (DCCR) [6,7].

Este trabalho visa realizar o estudo para otimização de parâmetros na soldagem de compósitos de PEI/fibra de vidro a partir do processo de soldagem em compósitos por resistência elétrica, utilizando como elemento resistivo a malha de 400 mesh. As variáveis que foram estudadas para o processo tempo, pressão e corrente elétrica aplicada e como resposta do planejamento de experimentos do sistema 2³, foi o do ensaio mecânico de *Lap-Shear*.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Laminado e o Elemento Resistivo

O laminado que foi submetido à soldagem foi o PEI/fibra de vidro, fornecidos pela empresa holandesa *Ten Cate, Advanced Composites*. Como elementos resistivos para os testes de soldagem com os compósitos foram utilizadas malhas metálicas de aço inox AI 304 de 400 mesh. As malhas

em forma de telas foram adquiridas comercialmente da empresa SOLOTEST, sendo repassadas da empresa TEGAPE.

2.2 Processo de Soldagem

Para o estudo da soldagem do compósito foi utilizada uma máquina de soldagem por resistência elétrica para compósitos, confeccionada pela empresa AUMEK) com base de dados obtidos por ABRAHÃO; 2015, que consiste basicamente em uma máquina de prensagem com c elétricos integrados resistivos na forma de aproximadamente 0,05mm de espessura, para garantir aquecimento e pressão local durante o processo de soldagem.

2.3. Planejamento Experimental

Para determinação dos melhores parâmetros para o processo de soldagem pelo processo de Resistência Elétrica, foi utilizado o planejamento experimental: *Central Composite Design* (CCD) para k fatores ($k = 3$ = pressão de consolidação, intensidade de corrente, tempo de soldagem) sendo uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo 2^3 , um design com um determinado número de pontos centrais (nesse trabalho, foram feitas seis replicatas no ponto central), e adicionalmente apresenta um grupo de níveis extras denominados de pontos axiais. O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores envolvidos no experimento ($2 \times 3 = 6$). Foram realizadas três replicatas do fatorial completo (2^3) e três replicatas dos pontos axiais. Portanto, tendo-se $(8+6) \times 3 + 6 = 48$ experimentos, considerando o teste de *Lap Shear*. A Tabela 1 evidencia os pontos investigados para a soldagem.

Tabela 1 - Níveis reais e codificados para as variáveis tempo, corrente e pressão, avaliadas segundo planejamento experimental estrela rotacional para o laminado de PEI/fibra de vidro.

Variáveis		Níveis				
Reais	Cod.*	- α	-1	0	+1	+ α
Tempo (s)	X ₁	10	20	35	50	60
Corrente (A)	X ₂	16,6	20	25	30	33
Pressão (MPa)	X ₃	0,7	0,7	1,85	3	3

*Codificado

2.4 Teste *Lap Shear*

Este método foi utilizado para determinação da variável resposta do planejamento experimental. O método consiste em aplicação de força de tração em corpos de prova soldados até a ruptura. Os ensaios foram realizados na máquina de tração marca SHIMATIZU baseando-se na norma ASTM D1002-10. As amostras de teste foram colocadas nas garras da máquina de ensaio universal e tracionadas a 1,5 mm / min (0,05 in / min) até falha.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Planejamento Experimental

Com os ensaios propostos pelo programa de planejamento experimental foram realizados os testes do ensaio mecânico de *Lap Shear*. A matriz experimental e os resultados que foram obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Matrizes experimentais e resultados de tensão de ruptura (*Lap Shear*) correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para o compósito PEI/vidro.

Testes	Corrente (A)	Tempo (s)	Pressão (MPa)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	20.00	20.00	0.70	1.01
2	30.00	20.00	0.70	12.96
3	20.00	50.00	0.70	4.71
4	30.00	50.00	0.70	13.85
5	20.00	20.00	3.00	0.75
6	30.00	20.00	3.00	12.00
7	20.00	50.00	3.00	5.59
8	30.00	50.00	3.00	12.98
9	16.59	35.00	1.85	0.50
10	33.41	35.00	1.85	14.17
11	25.00	9.77	1.85	2.88
12	25.00	60.23	1.85	11.80
13	25.00	35.00	0.70	13.47
14	25.00	35.00	3.78	14.60
15	25.00	35.00	1.85	13.82
16	25.00	35.00	1.85	13.01
17	25.00	35.00	1.85	13.22
18	25.00	35.00	1.85	14.14
19	25.00	35.00	1.85	13.15

Os valores obtidos de *Lap Shear* na soldagem do compósito de PEI/fibra de vidro, os resultados situaram-se na faixa entre 1,01 e 14,6 MPa. Ainda, a partir dos resultados encontrados, foi observado que o maior valor de resistência *Lap Shear* foi encontrado para a combinação proveniente do teste 14 (Tabela 2).

Para este trabalho, a avaliação dos efeitos das variáveis empregadas sobre a variável resposta foi também possível utilizando a análise de variância (ANOVA), adotando-se como critério da análise um nível de significância obtido inferior a 5 %, ou seja, um nível de significância estatística de 95%. Valores de "Prob> p" menores que 0,05 indicam termos do modelo são significativos.

Os modelos foram ajustados por meio do coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta explicada pelo modelo construído. Os resultados da ANOVA para os estudos dos efeitos das variáveis de tempo, pressão e temperatura para a soldagem dos compósitos de PEI/fibra de vidro são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem do compósito PEI/fibra de vidro nos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico.

Fator	Soma Quadrática	F	p
Modelo	496,37	32,60	< 0,0001*
X ₁	288,05	170,25	< 0,0001*
X ₂	47,28	27,95	< 0,0004*
X ₃	0,19	0,060	0,8108
X ₁ ²	83,90	49,59	< 0,0001*
X ₂ ²	83,77	49,52	< 0,0001*
X ₃ ²	0,12	0,069	0,7981
X ₁ X ₂	5,56	3,29	0,0999
X ₁ X ₃	0,75	0,44	0,5205
X ₂ X ₃	0,19	0,11	0,7450
Falta de ajuste	15,47	10,65	0,0107
Erro residual	16,92		
Erro Puro	1,45		
R²	0,9670		

*p: Valores significativos para $p < 0,05$, X₁: corrente codificada; X₂:tempo codificado; X₃:pressão codificada.

A partir deste estudo, verificou-se que, na soldagem do compósito PEI/fibra de vidro, as variáveis significativas foram a corrente elétrica e o tempo. Isto é constatado na Tabela 3, que mostra o teste de significância dos efeitos das variáveis independentes (tempo, corrente e pressão) sobre a variável resposta a tensão de ruptura avaliada a partir do teste de *Lap Shear*. Com esta análise verificou-se que a tensão de ruptura (variável resposta) das amostras soldadas foi dependente das variáveis independentes tempo e corrente elétrica, sendo que, a corrente também foi significativa considerando o efeito quadrático. Entretanto, a pressão e as interações desta variável não foram significativas para variável resposta considerada.

O teste p (Tabela 3) indicou significância estatística ao nível de 99% de confiança, não sendo constatada falta de ajuste para nenhum dos modelos avaliados (nível de confiança de 90%). Verifica-se, ainda, a partir do valor de R² que todas as equações ajustadas foram capazes de explicar mais de 96% da variabilidade dos valores experimentais. Desta forma, considerou-se que os modelos estatísticos obtidos foram adequados para descrever o processo de soldagem dos laminados

em função do tempo, da corrente elétrica e pressão aplicada. A partir dos resultados da Tabela 3 de ANOVA, foi possível compor os modelos estatísticos incluindo os coeficientes correspondentes aos efeitos significativos para o processo de soldagem dos laminados PEI/fibra de vidro utilizando-se do elemento resistivo malha de aço inox de 400 mesh. Os coeficientes relativos aos efeitos não significativos foram excluídos dos modelos. O modelo obtido é apresentado pela equação 1, correspondendo ao modelo da soldagem dos laminados PEI/fibra de vidro.

$$Lap\ Shear\ (MPa) = -99,10024 + 6,21157 \cdot X_1 + 1,1344 \cdot X_2 - 0,096109 \cdot X_1^2 - 0,010671 \cdot X_2^2 \quad (1)$$

5. CONCLUSÃO

Nesse estudo por planejamento experimental do laminado PEI/fibra de vidro para determinação das melhores condições de soldagem em relação ao maior valor de ruptura pelo ensaio de *Lap Shear*, utilizando-se como elemento resistivo a malha de 400 mesh, foi possível determinar as melhores condições de soldagem. Os melhores valores experimentais adquiridos foram obtidos a partir da utilização dos laminados soldados com corrente elétrica de 25A, pressão de 3,78MPa e tempo de 35s, com uma resistência mecânica obtida pelo ensaio de *Lap Shear* de 14,6 MPa.

6. REFERÊNCIAS

- [1] STAVROV D, BERSEE HEN. *Comp. Part A, Appl. Scienc. and Manuf.*, v. 36 p. 39-54, 2005.
- [2] REZENDE, M.C.; COSTA, M.L.; BOTELHO, E.C. *Compósitos estruturais - Tecnologia e prática*. 1. ed. São Paulo: ArtLiber, 2011. 396 p.
- [3] STAVROV, D.; BERSEE, H.E.N. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. *Composites: Part A 36, Design and Production of Composite Structures*, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, 2005.
- [4] ZHANG, B. et al. *Jour. of Memb. Scie.*, v. 474, p. 114–121, 2015.
- [5] MARINUCCI, G. *Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia*. Editora Artliber, São Paulo, 2011.
- [6] MOREIRA, A. et al. *Rev. Mat.*, vol. 20, p. 530–543, 2015.
- [7] PANNEERSELVAM, K.; ARAVINDAN, S.; NOORUL HAQ, A. *Mater. & Des.*, v. 41, p. 453–459, 2012.