



# ESTUDO DA SOLDAGEM POR OXI-COMBUSTÍVEL (OCW) PARA A JUNÇÃO HÍBRIDA DE COMPÓSITO PEI/FIBRA DE VIDRO E ALUMÍNIO 2024

J. F. REIS<sup>1,\*</sup>, A. B. M. ABRAHAO<sup>1,2</sup>, L. F. B. MARQUE<sup>1</sup>, C. E. F. SANTOS<sup>2</sup>, E. C. BOTELHO<sup>1</sup>

1 Departamento de Materiais e Tecnologia - Universidade Estadual Paulista/UNESP  
Avenida Doutor Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Guaratinguetá/SP, CEP.: 12570000, Brasil.  
Telefone: (12) 3123-2814

2 Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba  
Rod. Vereador Abel Fabrício Dias, Água Preta – Pindamonhangaba/SP, CEP.: 12445010, Brasil.  
Telefone: (12) 3642-5648

\*[jonasfrankreis@gmail.com](mailto:jonasfrankreis@gmail.com)

**RESUMO:** Atualmente, muitos materiais estruturais estão sendo desenvolvidos, buscando novas combinações de propriedades aliados a alta resistência específica. Consequente a isso, o desenvolvimento da tecnologia dos compósitos híbridos, combinando laminados poliméricos e alumínio, tem como uma de suas finalidades formarem um conjunto de materiais que combine elevados valores de resistência mecânica aliados ao seu baixo peso. O objetivo desse trabalho é o estudo da soldagem OCW para a junção do compósito PEI/Fibra de vidro e Alumínio 2024-T3, que aliam efetividade da junta e o baixo custo de operação. Foi realizado um planejamento experimental para a determinação dos parâmetros de soldagem OCW, sendo as amostras soldadas e submetidas ao ensaio de Lap Shear como a variável resposta do planejamento. O valor otimizado de Lap Shear obtido pelo estudo estatístico foi de 6.35 MPa. Após a otimização dos parâmetros, foi realizada a análise da microestrutura da junta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Soldagem OCW, Compósito PEI/Fibra de vidro, Alumínio 2024-T3, Planejamento experimental.

**ABSTRACT:** Currently, many structural materials are being developed, seeking new combinations of properties allied to specific high strength. Consequently, the development of hybrid composite technology, combining polymer laminates and aluminum, has as one of its purposes the formation of a set of materials that combines high values of mechanical resistance together with its low weight. The aim of this work is the study of OCW welding for the joining of the composite PEI / Fiberglass and Aluminum 2024 T3, which combine the effectiveness of the joint and the low cost of operation. An experimental design was carried out to determine the OCW welding parameters, and the samples were welded and subjected to the Lap Shear test as the planning response variable. The optimum value of Lap Shear obtained by the statistical study was 6.35 MPa. After the optimization of the parameters, the joint microstructure analysis was performed.

**KEYWORDS:** OCW Welding, PEI/Fiberglass Composite, Aluminum 2024-T3, Experimental Planning.



## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o rápido crescimento da indústria aeroespacial impulsiona o desenvolvimento de novos materiais para aeronaves, onde a redução dos custos de materiais e operação de aeronaves se tornou uma consideração importante (DURSUN; SOUTIS, 2014; ZHANG; CHEN; HU, 2018).

Os materiais que compõem as estruturas das aeronaves têm um grande impacto na redução de custos. Portanto, muitas pesquisas têm sido dedicadas ao desenvolvimento de materiais com propriedades otimizadas para reduzir o peso, melhorar a tolerância a danos, fadiga e resistência à corrosão (ZHANG; CHEN; HU, 2018).

Atualmente, a demanda global por aeronaves vem crescendo e o uso de compósitos reforçados com fibras vem ganhando destaque devido principalmente ao avanço tecnológico alcançado pelas indústrias aeroespaciais (HOLMES, 2017).

Os materiais compósitos são bem conhecidos por sua alta relação resistência / peso, boa resistência à tração, resistência à corrosão e fadiga em comparação ao aço, além de melhorar os tempos de fabricação e economizar os custos de produção. (HOLMES, 2017; M'SAOUBI et al., 2015).

Dentre os materiais compósitos, aqueles que possuem matrizes poliméricas, vêm ganhando grande destaque na indústria aeronáutica devido à sua baixa densidade, facilidade de fabricação e baixo custo (CHEN et al., 2013).

Os compósitos termoplásticos vêm crescendo mais rapidamente nos últimos anos e vêm substituindo os que apresentam matriz termorrígida, devido às melhores propriedades obtidas, à possibilidade de reutilização e reparo das mesmas e à facilidade na fabricação de grandes peças e complexas (CHEN et al., 2013; VIJAY; RAJKUMARA; BHATTACHARJEE, 2016).

Entre as ligas de alumínio, as ligas das séries 2xxx e 7xxx são as duas principais séries utilizadas para estruturas de aeronaves devido às suas excelentes propriedades mecânicas. No entanto, com o desenvolvimento dessas ligas estruturais, o alumínio 2024 (AA2024) mostrou-se um dos melhores materiais para atender as necessidades das indústrias aeronáuticas. (AHN et al., 2018; ANTHONY XAVIOR et al., 2018).

As ligas da série 2xxx, especificamente a liga de alumínio 2024 T3, têm excelente resistência à tração, bem como alta ductilidade, resistência à fadiga, maior dureza e resistência à fratura (AHN et al., 2018; XAVIOR; ASHWATH; RAJENDRAN, 2015).

O uso excessivo de compósitos poliméricos de alto desempenho em grandes aplicações em estruturas aeronáuticas está levando à produção de estruturas híbridas de alto desempenho, combinando as propriedades dos laminados poliméricos e de ligas de alumínio, que combinam altos valores de resistência mecânica e rigidez e baixa massa específica (ANDRÉ et al., 2016; LIONETTO et al., 2018a).

No entanto, a dificuldade de unir materiais dissimilares com propriedades físico-químicas tão distintas é um processo que ainda precisa ser estudado (KARAMI PABANDI; MOVAHEDI; KOKABI, 2017; LIONETTO et al., 2018b).

LIONETTO et al. (2018a) menciona que, além das propriedades divergentes, a reação na interface de junção e a incompatibilidade desses materiais são os principais obstáculos para a junção desses materiais. Como exemplo, pode-se citar a diferença na temperatura de fusão do alumínio 202-T3 (500-650°C) com a temperatura de transição vítrea do polímero polieterimida (217°C).

Normalmente, a união de estruturas híbridas envolvendo compósitos e metais avançados têm sido limitados ao uso de fixação mecânica e colagem. No entanto, devido às limitações dessas técnicas, como enfraquecimento da estrutura, ganho de peso, suscetibilidade à corrosão galvânica e à formação de concentradores de tensão (por fixação mecânica) e uma preparação rigorosa da

superfície do material, com um longo tempo de cura dos adesivos (juntas adesivas), limitam o uso desses processos de união. (ANDRÉ et al., 2016; LIONETTO et al., 2018a).

Conseqüentemente a isso, novas tecnologias envolvendo processos de soldagem estão sendo desenvolvidos, tendo como objetivo de substituir os métodos tradicionais de união de materiais dissimilares (STAVROV; BERSEE, 2005).

As vantagens do processo de soldagem em relação à fixação mecânica e colagem estão relacionadas principalmente às altas velocidades de soldagem, com as quais os componentes de compósitos termoplásticos ou metais podem ser unidos em um tempo de ciclo relativamente curto e com uma condição ambientalmente favorável, sendo reduzida ou até mesmo eliminada a preparação de superfície (PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012; STAVROV; BERSEE, 2005).

O processo de soldagem OCW (oxi-combustível) é um processo simples e barato para um processo de junção muito complexo, pois une dois materiais que apresentam uma discrepância de suas propriedades físicas e químicas. Este processo utiliza o conceito de solda a gás quente, descrito por YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON (2004).

O objetivo do presente estudo é avaliar a junção híbrida de AA2024-T3 com compósito termoplástico PEI (polieterimida) /Fibra de vidro pelo processo de soldagem por oxi-combustível. Para o desenvolvimento deste estudo, um planejamento experimental foi utilizado para determinar e otimizar os parâmetros mais adequados, considerando a distância e o tempo de exposição da chama na soldagem dos materiais. Os parâmetros de otimização mais adequados foram determinados a partir de ensaios de Lap Shear (LSS).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Laminados e Alumínio 2024 T3

O laminado termoplástico utilizado neste trabalho foi o PEI/fibra de vidro, fornecido pela empresa holandesa *TenCate Advanced Composites*. Já o alumínio 2024 T3 foi fornecido pela empresa *Alto Parts*. Para a soldagem, as amostras de alumínio foram lixadas para a retirada de qualquer oxido que pudesse interferir na soldagem.

### 2.2. Soldagem Oxi-Combustível (OCW)

A soldagem Oxi-Combustível consiste em uma tocha adaptada a um cilindro de gás, com um regulador de pressão no cilindro, onde a chama (propano) é concentrada e aplicada à amostra de alumínio (devido essa liga de alumínio possuir excelente condutividade térmica) em contato direto com a amostra do laminado a ser soldada.

Ao expor a chama ao alumínio, ocorre a transferência de calor, atingindo uma temperatura acima da transição vítrea da matriz do polímero termoplástico (em torno de 220°C), sendo a medição de temperatura realizada por um termopar a laser digital. Após a solidificação da matriz polimérica, obtém-se a junção dos dois materiais. Para a aplicação da pressão, barras de aço carbono foram utilizadas para contato direto entre as duas amostras a serem soldadas. Esse processo é ilustrado pela Figura 1.



**Figura 1.** Processo de Soldagem por Oxi-Combustível

### 2.3. Planejamento Experimental

A fim de determinar os parâmetros mais adequados para o processo de soldagem Oxi-Combustível, neste trabalho foi utilizado o delineamento experimental fatorial  $2^2$ , com cinco repetições no ponto central. Esse planejamento permite analisar os efeitos das variáveis nas respostas estudadas, quando se deseja avaliar duas variáveis ou fatores independentes em um processo ou experimento.

Este estudo tem como objetivo determinar os parâmetros de soldagem mais apropriados para a junção híbrida do compósito PEI/Fibra de Vidro e o Alumínio 2024-T3, utilizando como variáveis independentes: tempo e distância da tocha de soldagem. Como variável resposta para o estudo deste processo foi adotada a tensão de cisalhamento obtida a partir do ensaio Lap Shear

O delineamento experimental foi realizado através de testes empíricos envolvendo diferentes valores de distância e tempo. Os resultados obtidos foram analisados com o auxílio do software *Design Expert 6.0* (Stat Ease Corporation, EUA). A Tabela 1 apresenta os níveis reais das variáveis de tempo e distância da tocha, com seus valores mínimos, máximos e médios.

**Tabela 1.** Valores reais das variáveis: tempo e distância

Variáveis	Níveis		
Valores Reais	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
Tempo (s)	90	105	120
Distância (mm)	30	35	40

### 2.4. Ensaio de Lap Shear

O teste *Lap Shear* é atualmente considerado como sendo o método mais utilizado para a investigação da resistência de ruptura de juntas soldadas para compósitos. Este 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 *Shimadzu* baseando-se na norma ASTM D1002-10. A Figura 2 apresenta a máquina utilizada para o ensaio de tração e também os corpos de prova (dimensão: 100 x 25 mm) do ensaio.



Figura 2. Máquina de Tração utilizada.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Soldagem OCW

Para a realização do planejamento experimental e determinar quais parâmetros são adequados para a realização deste tipo de soldagem, foram realizados testes preliminares com o objetivo de determinar o valor mínimo e máximo para que ocorresse efetivamente a soldagem híbrida do alumínio 2024 T3 e Compósito PEI/Fibra de vidro. Para a chama, um valor de pressão constante do cilindro foi determinado como sendo 5psi.

No início, foram determinados três parâmetros para a realização da soldagem: tempo de exposição da chama no alumínio (s), distância da tocha nos materiais a serem soldados (mm) e pressão de aperto das barras de aço (Kgf). No entanto, como o processo está em desenvolvimento, não houve efetividade nos cálculos estatísticos com a inclusão da pressão como parâmetro, devido à dificuldade de medir com precisão a pressão exercida durante o processo.

Sendo aplicados apenas os parâmetros de tempo e distância, a soldagem foi realizada com os seus valores máximos e mínimos, valores estes obtidos através da realização da soldagem OCW em diversas amostras.

Com isso, foi observado que um tempo abaixo de 90 segundos não foi suficiente para que a temperatura do processo pudesse exceder a temperatura de transição vítrea da matriz polimérica, não ocorrendo, portanto, a junção híbrida dos materiais. Durante um tempo superior a 120 segundos, a temperatura excedeu 430 ° C, degradando a matriz polimérica.

Com a distância da tocha abaixo de 30 mm, houve degradação quase completa do compósito polimérico. Já com uma distância superior a 40 mm não houve tempo suficiente para a união dos materiais. Com estes resultados, os valores dos parâmetros foram determinados conforme a Tabela 1 e sendo aplicados ao programa estatístico.

#### 3.2 Planejamento Experimental

O planejamento experimental denominado *Central Composite Design* (CCD) para  $k = 2$  fatores, é uma matriz formada por dois grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo  $2^2$ ; um *design* com um determinado número de pontos centrais. Para este estudo foram avaliadas cinco replicatas do fatorial completo ( $2^2$ ).

Portanto, 13 experimentos foram realizados para realização da soldagem. Em cada experimento, três amostras foram soldadas com o objetivo de se determinar uma melhor média dos resultados de Lap Shear, sendo no total de 39 amostras soldadas para a realização do dado estatístico.

Os resultados obtidos dos experimentos realizados com a junção do Alumínio 2024 T3 e do compósito PEI/Fibra de Vidro é apresentado pela Tabela 2. Na Tabela 2 verifica-se que os valores de Lap Shear obtidos encontram-se entre 0.42 a 6.91 MPa, sendo o maior valor obtido no standard 9.

**Tabela 2.** Resultados de Lap Shear correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para a junção do AA2024 T3 e compósito PEI.

Standard	Variáveis Estudadas		Variável Resposta
	Tempo (s)	Distância (mm)	Lap Shear (MPa)
1	90	30	5.74
2	120	30	6.58
3	90	40	5.74
4	120	40	0.77
5	83.79	35	3.65
6	126.21	35	0.42
7	105	27.93	5.49
8	105	42.07	3.78
9	105	35	6.91
10	105	35	4.42
11	105	35	6.12
12	105	35	4.67
13	105	35	6.24

Com o intuito de assegurar a confiabilidade na análise estatística realizada anteriormente, neste trabalho optou-se também pela realização da análise de variância. O resultado de ANOVA para os estudos dos efeitos das variáveis de tempo e distância para a soldagem híbrida de Alumínio2024 T3 e compósito PEI/Fibra de vidro são apresentados pela Tabela 3.

**Tabela 3.** Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem por Oxi-Combustível da junção Híbrida AA2024 T3 e Compósito PEI.

Variáveis	Soma Quadrática	Média Quadrática	Valor de F	Prob>p
Modelo	41.36	8.27	6.01	0,0179*
Tempo	9.68	9.68	7.03	0.0328*
Distancia	8.26	8.26	6.00	0.0441*
Tempo <sup>2</sup>	15.27	15.27	11.10	0.0126*
Distancia <sup>2</sup>	0.23	0.23	0.17	0.6951
Tempo – Distancia	8.15	8.15	5.93	0.0451*
Erro Residual	9.63	1.38		
Erro de Ajuste	5.0	1.67	1.44	0.3559
Erro Puro	4.63	1.16		
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,8112</b>			

\*p: Valores significativos para  $p < 0,05$ .

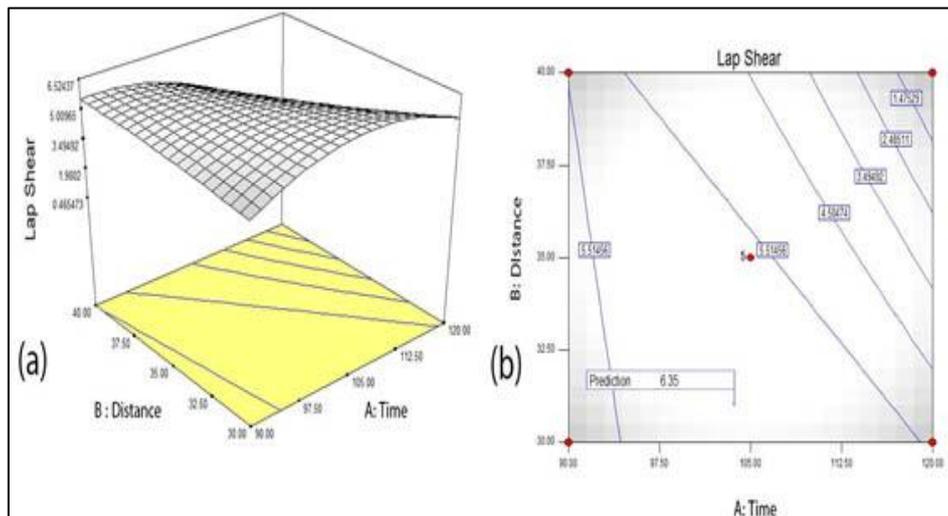
A partir deste estudo, verificou-se que, na soldagem por OCW as variáveis significativas foram o tempo, distância, tempo quadrático, a distância quadrática e o tempo com a distância, sendo constatado na Tabela 5. Com esta análise verificou-se que a tensão de ruptura (variável resposta) das amostras soldadas foi dependente das variáveis independentes (tempo e distância) e também com as variáveis conjuntas.

Em relação ao valor de  $R^2$  obtido, mais de 81,12% da variabilidade experimental pode ser explicada pelo modelo quadrático relativo à variável resposta. O modelo proposto para a análise da soldagem foi estatisticamente significativo sem falta de ajuste ao nível de confiança de 95%.

Verifica-se, ainda, a partir do valor de  $R^2$  que todas as equações ajustadas foram capazes de explicar mais de 81% da variabilidade dos valores experimentais. Desta forma, considerou-se que os modelos estatísticos obtidos foram adequados para descrever o processo de soldagem híbrida do Alumínio 2024 T3 e compósito PEI/Fibra de Vidro em função do tempo e da distância.

A partir das condições otimizadas foram construídos, utilizando-se o mesmo programa, gráficos de superfície de resposta referentes aos valores de variáveis buscando-se os maiores valores preditos pelo modelo dos ensaios de Lap Shear.

A superfície de resposta com as regiões de otimização é apresentado pela Figura 3. Analisando estatisticamente os resultados provenientes da soldagem (Figura 3) o valor máximo da variável resposta predita pelo programa de acordo com os resultados experimentais foi de 6,35 MPa, que indicou o emprego das variáveis independentes estudadas em valores aprimorados dentro das faixas pré-determinadas, sendo estas: 103,66 segundos e 31,03 milímetros.

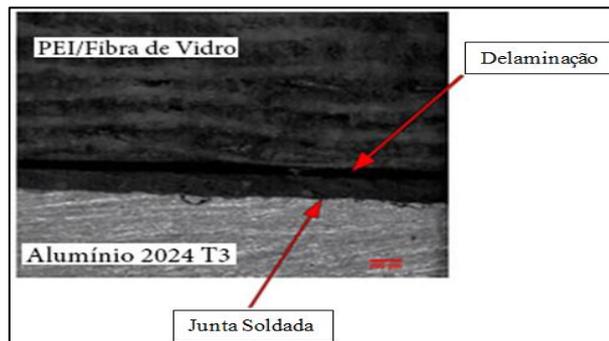


**Figura 3.** (a) Superfície de resposta e (b) curvas de nível para a soldagem de AA2024 T3 e compósito PEI.

A partir da comparação entre os valores experimentais e do modelo teórico apresentado na Figura 3, pode ser concluído que o planejamento estatístico utilizado neste estudo foi eficiente para a avaliação dos fatores e também para determinação das condições otimizadas do processo de soldagem. Desta forma, os modelos utilizados foram eficientes sendo possível construir superfícies de respostas correspondentes e definir regiões de interesse.

### 3.3 Análise da Junta Soldada

Para a análise da qualidade da junta soldada, foram realizadas as análises por microscopia ótica de amostras soldadas pelo processo de soldagem OCW. Foi utilizado um microscópio Software PL-A6xx Capture com aumento de 1,5 e 4,5x. A Figura 4 apresenta uma amostra soldada pelo processo OCW de alumínio e compósito com uma escala de 4,5x.



**Figura 4.** Amostra de PEI/Vidro e Alumínio 2024 T3 soldados com escala de 4,5x. Observa-se a ocorrência de delaminação na junta já soldada.

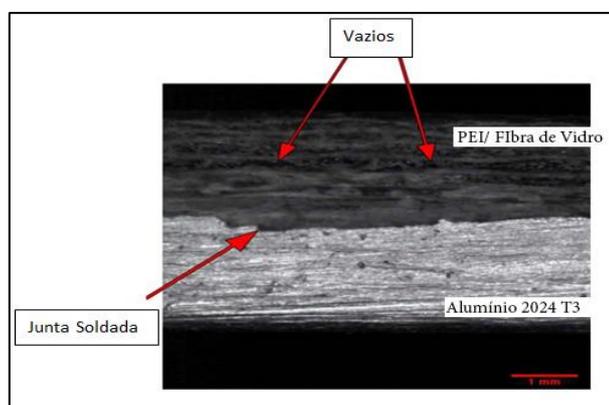
É observada uma união efetiva da região da junção entre o compósito termoplástico com o alumínio 2024-T3 como apontado pela Figura 4. Entretanto, ao longo do material compósito, pode-se observar a presença de delaminação e também a presença de vazios, como também apontado pela Figura 4.

Segundo o relato de GOUSHEGIR; DOS SANTOS; AMANCIO-FILHO (2014), esse fenômeno pode ser causado pela diferença de expansão térmica das fibras e matrizes poliméricas após a solidificação, reduzindo as propriedades de adesão entre as fibras e de vidro e a matriz polimérica PEI, ocorrendo a delaminação e o descolamento das fibras/matriz durante o processo.

Dessa forma, a redução da resistência do material estudado pode ser explicada pela exposição do compósito na soldagem, sendo a presença desses defeitos não afetando a região de união com o alumínio, mas afetando a resistência do material polimérico. Defeitos esses que podem ser prevenidos com um aprimoramento do dispositivo de soldagem.

A Figura 5 apresenta uma imagem da junta soldada com uma escala de 1,5x. Observa-se a boa interação entre os dois materiais dissimilares, obtendo uma junção efetiva dos materiais. Entretanto, observa-se a presença de vazios na interface entre as fibras e matriz de PEI.

Como relatado por GOUSHEGIR; DOS SANTOS; AMANCIO-FILHO (2014), esses vazios são devidos ao aprisionamento de ar na camada do polímero que, quando amolecido, ocorre o escoamento da matriz. No entanto, o resultado obtido pelo planejamento experimental e valores máximos obtidos pelo Lap Shear, como também na junção efetiva observada pela microscopia, demonstrou que o processo é efetivo para a junção híbrida do Alumínio 2024 T3 e o Compósito PEI/Fibra de vidro.



**Figura 5.** Presença de vazios consequentes da solidificação do polímero termoplástico.



#### 4. CONCLUSÃO

A soldagem por OCW foi aplicada para a união do Alumínio 2024-T3 e o Compósito PEI/Fibra de vidro. As seguintes conclusões foram obtidas a partir desse estudo:

- a) Através dos dados do planejamento experimental, foi possível comprovar, estatisticamente, a viabilidade do processo de soldagem OCW para a junção de materiais que se divergem em suas propriedades físico-químicas, tornando-se uma alternativa a junção desses tipos de materiais estruturais.
- b) A partir da aplicação do planejamento experimental, foi possível determinar o melhor parâmetro para a realização da soldagem, sendo o tempo de 103.66 segundos e a distância da tocha de 31.03 milímetros, para a obtenção de um valor de Lap Shear de 6,35 MPa.
- c) O processo de soldagem por OCW ainda está em desenvolvimento, então é necessário realizar diversas adaptações e análises mais profundas para se determinar que realmente seja um processo que possa ser aplicado de forma efetiva a junção de materiais híbridos.
- d) Um maior controle da pressão exercida da junta a ser soldada, a criação de um dispositivo que não há perda de calor durante a exposição das amostras na soldagem, um maior controle de vazão de gás do processo e realização da soldagem com outros tipos de gases, aplicação de mais um parâmetro que possa exercer uma influência no processo e, a partir disso, determinar estatisticamente os melhores parâmetros para sua aplicação.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo apoio financeiro.

#### 6. REFERÊNCIAS

AHN, J. et al. Optimisation of process parameters and weld shape of high power Yb-fibre laser welded 2024-T3 aluminium alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 34, n. May, p. 70–85, 2018.

ANDRÉ, Natália M. et al. Friction Spot Joining of aluminum alloy 2024-T3 and carbon-fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) laminate with additional PPS film interlayer: Microstructure, mechanical strength and failure mechanisms. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 94, p. 197–208, 2016.

ANTHONY XAVIOR, M. et al. Mechanical properties evaluation of hot extruded AA 2024 –Graphene Nanocomposites. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 12519–12524, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221478531830436X>>

CHEN, Qi et al. Fabrication and mechanical properties of hybrid multi-scale epoxy composites reinforced with conventional carbon fiber fabrics surface-attached with electrospun carbon nanofiber mats. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 1–7, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.005>>



DURSUN, Tolga; SOUTIS, Costas. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. **Materials and Design**, [s. l.], v. 56, p. 862–871, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>>

GOUSHEGIR, S. M.; DOS SANTOS, J. F.; AMANCIO-FILHO, S. T. Friction Spot Joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly(phenylene sulfide) composite single lap joints: Microstructure and mechanical performance. **Materials and Design**, [s. l.], v. 54, p. 196–206, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.034>>

HOLMES, Mark. Aerospace looks to composites for solutions. **Reinforced Plastics**, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 237–241, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.repl.2017.06.079>>

KARAMI PABANDI, Hossein; MOVAHEDI, Mojtaba; KOKABI, Amir Hossein. A new refill friction spot welding process for aluminum/polymer composite hybrid structures. **Composite Structures**, [s. l.], v. 174, p. 59–69, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.053>>

LIONETTO, Francesca et al. Hybrid welding of carbon-fiber reinforced epoxy based composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 104, p. 32–40, 2018. a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.021>>

LIONETTO, Francesca et al. Ultrasonic spot welding of carbon fiber reinforced epoxy composites to aluminum: mechanical and electrochemical characterization. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 144, n. February, p. 134–142, 2018. b.

M'SAOUBI, Rachid et al. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 557–580, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.002>>

PANNEERSELVAM, K.; ARAVINDAN, S.; NOORUL HAQ, A. Study on resistance welding of glass fiber reinforced thermoplastic composites. **Materials and Design**, [s. l.], v. 41, p. 453–459, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.025>>

STAVROV, D.; BERSEE, H. E. N. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 39–54, 2005.

VIJAY, N.; RAJKUMARA, V.; BHATTACHARJEE, P. Assessment of Composite Waste Disposal in Aerospace Industries. **Procedia Environmental Sciences**, [s. l.], v. 35, p. 563–570, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187802961630130X>>

XAVIOR, M. Anthony; ASHWATH, P.; RAJENDRAN, R. IMECE2015-50103. [s. l.], n. January 2016, 2015.

YOUSEFPOUR, Ali; HOJJATI, Mehdi; IMMARIGEON, Jean Pierre. Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 303–341, 2004.

ZHANG, Xuesong; CHEN, Yongjun; HU, Junling. Recent advances in the development of aerospace materials. **Progress in Aerospace Sciences**, [s. l.], v. 97, n. August 2017, p. 35–60, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001>>