

**JONAS FRANK REIS**

**Estudo da soldagem entre alumínio 2024-T3 e compósito PEI/fibra de vidro  
para aplicação aeronáutica**

Guaratinguetá  
2021

JONAS FRANK REIS

**Estudo da soldagem entre alumínio 2024-T3 e compósito PEI/fibra de vidro para  
aplicação aeronáutica**

Tese apresentada à faculdade de Engenharia do  
Campus de Guaratinguetá, Universidade  
Estadual Paulista, para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia Mecânica na área de  
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Ana Beatriz Ramos Abrahão

Guaratinguetá  
2021

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       | Reis, Jonas Frank                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| R375e | <p>Estudo da soldagem entre alumínio 2024-T3 e compósito PEI/fibra e vidro para aplicação aeronáutica / Jonas Frank Reis – Guaratinguetá, 2021<br/> 171 f. : il.<br/> Bibliografia: f. 149-163</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.<br/> Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho<br/> Coorientadora: Profª Drª Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão</p> <p>1. Soldagem. 2. Materiais compostos. 3. Ligas de alumínio.<br/> 4. Planejamento experimental. I. Título</p> <p>CDU 621.791(043)</p> |

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595



**JONAS FRANK REIS**

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
**Profª. Drª. Ivonete Ávila**  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**

  
**PROF. DR. EDSON COCCHIERI BOTELHO**

**Orientador / UNESP/FEG**  
participou por videoconferência

  
**PROF. DR. ROBERTO ZENHEI NAKAZATO**

**UNESP/FEG**  
participou por videoconferência

  
**PROFª. DRª. MICHELLE LEALI COSTA**

**UNESP/FEG**  
participou por videoconferência

  
**PROF. DR. MILTON SÉRGIO FERNANDES DE LIMA**

**ITA**  
participou por videoconferência

  
**PROF. DR. EVANDRO LUIS NOHARA**

**UNITAU**  
participou por videoconferência

Fevereiro de 2021

## **DADOS CURRICULARES**

### **JONAS FRANK REIS**

|            |                                                                                                                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NASCIMENTO | 01.09.1989 – Guaratinguetá / SP                                                                                                                                  |
| FILIAÇÃO   | Antônio Carlos Reis<br>Maria Teresa Frank                                                                                                                        |
| 2011/2013  | Curso de Graduação<br>Tecnologia em Mecânica – Processos de Soldagem – Faculdade de<br>Tecnologia de Pindamonhangaba.                                            |
| 2014/2016  | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de<br>Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de<br>Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista  |
| 2016/2021  | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de<br>Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de<br>Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista |

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela minha vida, saúde e o bem de todos que fazem parte da minha história. Sem Deus não somos ninguém.

Agradeço pela minha família e todas as pessoas que eu amo que sempre me apoiaram e incentivaram meus estudos, me proporcionando tudo que é necessário para me tornar o que sou hoje.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho, pela grande amizade, paciência, suporte e dedicação ao meu trabalho, que deu a oportunidade de fazer parte de seu grupo tão incentivador e acolhedor.

A minha Co-orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Ana Beatriz Ramos Abrahão, pela competência e segurança na orientação, pela capacidade de criar as condições para a execução deste trabalho, pelo incentivo ao nosso crescimento profissional e pela sua amizade.

Aos amigos, funcionários e professores da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá e da FATEC de Pindamonhangaba pela presteza e principalmente pela grande ajuda e dedicação durante todos esses anos.

Ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv) pela oportunidade da utilização dos equipamentos, a todos os funcionários e ao professor Milton Sérgio pela ajuda e dedicação que me propuseram um grande aprendizado.

A todos aqueles que me ajudaram, de forma direta ou indiretamente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.

Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”

Madre Teresa de Calcutá.

## RESUMO

O aumento da utilização de materiais avançados, como compósitos termoplásticos e ligas de alumínio, em setores vinculados a indústria aeronáutica é atribuído principalmente às suas excelentes propriedades mecânicas associada a sua elevada resistência específica (relação resistência/peso). Em consequência a este panorama, torna-se imprescindível a interação entre esses materiais na estrutura de uma aeronave e, consequentemente um estudo desses materiais visando a união de ambos. A soldagem se destaca, em relação aos métodos de união por rebite e colagem, por proporcionar um método de união efetivo, sem o aumento do peso na estrutura e com tempos reduzidos na produção de juntas. Desta forma, este trabalho tem como principal objetivo a obtenção de juntas soldadas envolvendo o compósito PEI (poli (éter-imida)) reforçado com fibra de vidro e ligas de alumínio 2024-T3 (AA2024-T3) a partir dos processos de soldagem por oxi-combustão (OFW – *Oxi-Fuel Welding*) e soldagem a laser por Yb: fibra. Neste trabalho foi utilizado o planejamento experimental tipo fatorial completo  $2^2$  como variável resposta a tensão de ruptura (MPa) obtida a partir do ensaio mecânico de *Lap Shear* (LSS). Para a soldagem a laser foram analisadas as variáveis do processo: velocidade e potência do feixe e a soldagem por OFW foram consideradas as variáveis: distância da chama e tempo. Além disso, uma análise da viabilidade do ensaio de ILSS (Resistência ao Cisalhamento Interlaminar) foi realizado para a soldagem por OFW. Para a soldagem por OFW foi obtido um valor otimizado de LSS de 6,32 MPa. Já para os valores otimizados para a soldagem a laser chegou-se a 8,06 MPa. Após os valores obtidos estatisticamente, as amostras da liga AA2024-T3 foram anodizadas com o intuito de aumentar o intertravamento na interface soldada dos materiais. Considerando os resultados obtidos a partir da soldagem por OFW, obteve-se o dobro do valor de LSS (13,80 MPa) com amostras soldadas utilizando a liga anodizada em relação a liga como recebida. Por conseguinte, a partir da soldagem a laser, obteve-se um valor de LSS de 13,85 MPa. A partir desses resultados, o processo a laser foi aprimorado, aplicando-se dois cordões em amostras da liga de alumínio anodizada e obtendo um valor de LSS de 16,02 MPa. Finalmente, foram realizadas caracterizações nos materiais soldados a partir da análise por estereoscópio e microscopia óptica que constituíram junta em condições otimizadas estabelecidas neste estudo. Em ambos os processos foi constatada a influência da soldagem na morfologia da liga de alumínio, convertendo sua estrutura em grãos equiaxiais e formando partículas de segunda fase (dispersóides), a partir da segregação de precipitados, que causaram a redução de sua dureza. Com aplicação correta dos parâmetros e a devida proteção do compósito polimérico frente ao aquecimento de ambos os processos de soldagem, sua morfologia não apresentou mudanças ou a presença de defeitos que pudessem interferir em sua propriedade. Por fim, a análise potenciodinâmica constatou que a liga anodizada apresentou menor densidade de corrente e, consequentemente, uma maior resistência à corrosão se comparado a liga como recebida e após as soldagens.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compósito PEI/fibra de vidro. Liga AA2024-T3. Soldagem por OFW. Soldagem a laser Yb: fibra. Planejamento experimental. Anodização.

## ABSTRACT

The increase in the use of advanced materials, such as thermoplastic composites and aluminum alloys, in sectors linked to the aeronautical industry is mainly attributed to its excellent mechanical properties associated with its high specific resistance (resistance / weight ratio). As a consequence of this panorama, the interaction between these materials in the structure of an aircraft becomes essential and, consequently, a study of these materials aiming at the union of both. Welding stands out, in relation to the methods of joining by rivet and gluing, for providing an effective method of joining, without increasing the weight in the structure and with reduced times in the production of joints. Thus, this work has as main objective the obtaining of welded joints involving the composite PEI (poly (imide ether)) reinforced with fiberglass and aluminum alloys 2024 T3 (AA2024-T3) from the oxy-combustion welding processes (OFW - Oxi Fuel Welding) and laser welding by Yb: fiber. In this work, a full factorial type 2<sup>2</sup> experimental design was used as the response to rupture stress (MPa) obtained from the Lap Shear mechanical test (LSS). For laser welding, the process variables were analyzed: beam speed and power and OFW welding was considered the variables: flame distance and time. In addition, an analysis of the feasibility of the ILSS (Interlaminar Shear Resistance) test was performed for OFW welding. For OFW welding, an optimized LSS value of 6.32 MPa was obtained. The values optimized for laser welding reached 8.06 MPa. After the values obtained statistically, the samples of the alloy AA2024-T3 were anodized in order to increase the interlock at the welded interface of the materials. Considering the results obtained from the welding by OFW, it was obtained twice the value of LSS (13.80 MPa) with samples welded using the anodized alloy in relation to the alloy as received. Therefore, from laser welding, an LSS value of 13.85 MPa was obtained. From these results, the laser process was improved by applying two beams to anodized aluminum alloy samples and obtaining an LSS value of 16.02 MPa. Finally, characterizations were carried out on the welded materials from the analysis by stereoscope and optical microscopy that formed a joint under the optimized conditions established in this study. In both processes, the influence of welding on the morphology of the aluminum alloy was verified, converting its structure into equiaxial grains and forming second phase particles (dispersoids), from the segregation of precipitates, which caused the reduction of its hardness. With correct application of the parameters and the due protection of the polymeric composite against the heating of both welding processes, its morphology did not present changes or the presence of defects that could interfere in its property. Finally, the potentiodynamic analysis found that the anodized alloy had lower current density and, consequently, greater resistance to corrosion when compared to the alloy as received and after welding.

**KEY WORDS:** Glass fiber/PEI composite. Alloy AA2024-T3. OFW welding. Yb: Fiber laser welding. Experimental planning. Anodizing.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Quantidade de materiais utilizados em aeronaves da série Boeing. ....                                                                                                                                                            | 26 |
| Figura 2 - Uso de compósitos na aeronave da <i>Airbus A380</i> . ....                                                                                                                                                                       | 28 |
| Figura 3 - Estrutura do Poli (éter-imida). ....                                                                                                                                                                                             | 31 |
| Figura 4 - Os principais tipos de ligas de alumínio. ....                                                                                                                                                                                   | 33 |
| Figura 5 – a) Camada de óxido ( $Al_2O_3$ ) criada pela anodização na superfície da liga AA2024-T3; b) Diagrama esquemático de uma seção transversal de um filme anódico poroso em alumínio, mostrando as regiões da barreira e porosa..... | 36 |
| Figura 6 - Formação da camada anódica da liga AA2024-T3 pelo processo de anodização. ..                                                                                                                                                     | 37 |
| Figura 7 - Soldagem em materiais compósitos termoplásticos. ....                                                                                                                                                                            | 42 |
| Figura 8 - Descrição esquemática dos regimes por condução e <i>keyhole</i> . ....                                                                                                                                                           | 47 |
| Figura 9 - Componente padrão de soldagem a laser por fibras. ....                                                                                                                                                                           | 51 |
| Figura 10 - Componente padrão da soldagem gás quente em materiais termoplásticos. ....                                                                                                                                                      | 53 |
| Figura 11 - Modos de falha em compósitos reforçados com fibra. ....                                                                                                                                                                         | 61 |
| Figura 12 - Fluxograma apresentando em síntese o trabalho experimental realizado.....                                                                                                                                                       | 63 |
| Figura 13- Regulador de pressão utilizado no processo OFW. ....                                                                                                                                                                             | 65 |
| Figura 14 - a) Bico de corte acoplado ao maçarico de soldagem OFW; b) pirômetro utilizado no estudo.....                                                                                                                                    | 66 |
| Figura 15 - Dispositivo de soldagem OFW em detalhes. ....                                                                                                                                                                                   | 67 |
| Figura 16 - Aplicação da soldagem por OFW: (a) montagem do sistema de soldagem; (b) aplicação da chama do processo em detalhes.....                                                                                                         | 68 |
| Figura 17 - Desenho esquemático do molde produzido. ....                                                                                                                                                                                    | 69 |
| Figura 18 - Material refratário produzido.....                                                                                                                                                                                              | 70 |
| Figura 19 - Desenho esquemático do dispositivo otimizado para a soldagem por OFW.....                                                                                                                                                       | 70 |
| Figura 20 - Aplicação do dispositivo na soldagem por OFW. ....                                                                                                                                                                              | 71 |
| Figura 21 - Configuração esquemática do processo a laser por fibra óptica. ....                                                                                                                                                             | 72 |
| Figura 22 – a) Equipamento soldagem a laser Yb: fibra utilizado no estudo; (b) soldagem a laser Yb: fibra entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3 em detalhes. ....                                                         | 73 |
| Figura 23 - a) Célula eletrolítica utilizada no processo de anodização; b) estabilização da corrente elétrica do processo de anodização.....                                                                                                | 78 |
| Figura 24 – Ilustração do ensaio de LSS para as amostras soldadas. ....                                                                                                                                                                     | 80 |
| Figura 25 - Estereoscópio da marca ZEISS utilizado no estudo. ....                                                                                                                                                                          | 81 |

|                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 26 - Microscópio Lupa Zeiss/Stemi 2000. ....                                                                                                                                                                                                    | 82  |
| Figura 27 - Equipamento termogravimétrico SII Exstar 6000. ....                                                                                                                                                                                        | 83  |
| Figura 28 - Microscópio confocal interferométrico Leica DCM 3D.....                                                                                                                                                                                    | 84  |
| Figura 29 – Equipamento Wolpert 121 utilizado para determinação da dureza Vickers. ....                                                                                                                                                                | 85  |
| Figura 30 - Inclinações da curva Tafel. ....                                                                                                                                                                                                           | 87  |
| Figura 31 - Inclinação de Tafel para obtenção da densidade de corrente.....                                                                                                                                                                            | 88  |
| Figura 32 - Célula eletroquímica utilizada. ....                                                                                                                                                                                                       | 88  |
| Figura 33 – Corpos de prova obtidos a partir da soldagem OFW - (a) uma excessiva pressão sobre a junta soldada causando um escoamento lateral do laminado PEI; (b) presença de degradação nas bordas da junção do laminado PEI e a liga AA2024-T3..... | 92  |
| Figura 34 - Junta soldada do compósito PEI/fibra de vidro e a ligaAA2024-T3 soldado pelo dispositivo refratário.....                                                                                                                                   | 92  |
| Figura 35 - Diagrama esquemático da união do laminado PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 por condução térmica. ....                                                                                                                                 | 93  |
| Figura 36 - Formação de <i>keyhole</i> com um tempo de aplicação de seis segundos.....                                                                                                                                                                 | 96  |
| Figura 37 - Junta soldada pelo processo a laser por condução térmica sem a formação de um orifício. ....                                                                                                                                               | 97  |
| Figura 38 - Resultados de TGA/DTG para os compósitos PEI/fibra de vidro: (a) como recebido; (b) após a soldagem por OFW; (c) após a soldagem a laser Yb: fibra. ....                                                                                   | 98  |
| Figura 39 - Mecanismos de decomposição térmica da cisão da cadeia polimérica de PEI.....                                                                                                                                                               | 99  |
| Figura 40 - Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente a soldagem OFW em amostras soldadas entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3. ....                                    | 106 |
| Figura 41 - Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente a soldagem a laser em amostras soldadas entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3.....                                 | 106 |
| Figura 42 - a) Superfície de resposta da soldagem OFW; b) curvas de nível na soldagem entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3.....                                                                                                     | 108 |
| Figura 43 - a) Superfície de resposta da soldagem a laser Yb: fibra; b) curvas de nível na soldagem entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3. ....                                                                                      | 109 |
| Figura 44 - (a) Análise por microscopia óptica da liga AA2024-T3 antes da soldagem (com ampliação de 10x); (b) Presença de prováveis partículas de dispersóides ou contaminação do metal base na liga AA2024-T3 (com ampliação de 20x). ....           | 110 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 45 – a) Formação de prováveis precipitados de <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , provenientes da anodização da liga AA2024-T3 (com ampliação de 20x); b) detalhes da microestrutura da liga AA2024 após o processo de anodização (com ampliação de 50x)..... | 112 |
| Figura 46 – Microestrutura da liga AA2024-T3: a) como recebida; b) após a anodização. ..                                                                                                                                                                              | 113 |
| Figura 47 - Topografias da superfície da liga AA2024-T3: a) Como recebida; b) anodizada. ....                                                                                                                                                                         | 114 |
| Figura 48 – Ensaio de ILSS - (a) amostra submetida ao ensaio de ILSS; (b) amostra fraturada após o ensaio.....                                                                                                                                                        | 115 |
| Figura 49 – Análise da união entre o compósito e a liga AA2024-T3 fraturada após o ensaio ILSS: (a) descolamento de fibra/matriz; (b) presença de delaminações e descolamento de fibra/matriz possivelmente devido ao processo de solidificação.....                  | 116 |
| Figura 50 - Microestrutura da liga AA2024-T3 após a soldagem por OFW.....                                                                                                                                                                                             | 117 |
| Figura 51 – (a) Maior presença de prováveis dispersóides na superfície da liga AA2024-T3; (b) Detalhe dos prováveis dispersóides presentes na liga, devido a segregação dos elementos de liga frente ao aquecimento proveniente da soldagem OFW.....                  | 119 |
| Figura 52 – Análise por microscopia óptica da união entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 com os parâmetros otimizados de tempo e distância. ....                                                                                                   | 121 |
| Figura 53 - Deteriorações de fibras e resíduos de alumínio presentes na matriz polimérica, ocorridas pelo excesso de calor da chama. ....                                                                                                                             | 122 |
| Figura 54 - Baixa qualidade da microestrutura do laminado PEI/fibra de vidro sem a devida proteção pelo processo OFW.....                                                                                                                                             | 123 |
| Figura 55 - Junta soldada entre o laminado com a liga AA2024-T3 anodizada: a) presença de vazios no laminado, devido a falta de proteção no processo; b) sem a presença de vazios com a devida proteção no processo.....                                              | 124 |
| Figura 56 - Morfologia do compósito PEI/fibra de vidro após a soldagem por OFW (ampliação de 10x). ....                                                                                                                                                               | 125 |
| Figura 57 – Análise por microscopia óptica do compósito PEI/fibra de vidro fraturada após o ensaio de LSS. ....                                                                                                                                                       | 125 |
| Figura 58 - Formação de trincas a quente e porosidades na liga AA2024-T3 soldada com o compósito PEI/fibra de vidro.....                                                                                                                                              | 127 |
| Figura 59 – Análise por macroscopia óptica da liga AA2024-T3 fraturada com o resultado da junção da liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro soldados por laser. ....                                                                                          | 129 |

|                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 60 – Análise por macroscopia do laminado fraturado com o resultado da união da liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro soldados a laser. ....                                                    | 129 |
| Figura 61 - Morfologia da liga AA2024-T3 após a soldagem a laser Yb: fibra. ....                                                                                                                                | 131 |
| Figura 62 - Região entre a ZTA e o MB. ....                                                                                                                                                                     | 132 |
| Figura 63 - Região da ZTA da liga AA2024-T3 que mostra em detalhes os contornos de grãos presentes. ....                                                                                                        | 132 |
| Figura 64 - Amostra soldada pelo processo a laser Yb: fibra entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 anodizada a partir de dois cordões. ....                                                    | 133 |
| Figura 65 - Gráfico Força x Deslocamento obtido a partir do ensaio LSS nas condições da liga AA2024-T3: como recebida, anodizada e otimizada (a partir da anodização e aplicação de dois feixes de laser). .... | 135 |
| Figura 66 - Interação da matriz polimérica PEI com a liga AA2024-T3 anodizada após a fratura por LSS: a) ampliação de 1,6x; b) ampliação de 0,65x. ....                                                         | 136 |
| Figura 67 – Análise por macroscopia da soldagem entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 não anodizada (ampliação de 0,65x). ....                                                                | 136 |
| Figura 68 – Análise por macroscopia da amostra fraturada com o maior valor de LSS (ampliação de 0,65x). ....                                                                                                    | 137 |
| Figura 69 - Região da interface a partir da otimização entre o AA2024-T3 anodizado e o compósito PEI/fibra de vidro: a) ampliação de 0,65x; b) ampliação de 15x. ....                                           | 138 |
| Figura 70 – Morfologia da amostra soldada por um cordão de solda: fraco intertravamento na interface soldada (ampliação de 5x). ....                                                                            | 139 |
| Figura 71 - Morfologia do compósito PEI/fibra de vidro após a soldagem a laser, com alguns pontos de solidificação da matriz termoplástica (ampliação de 5x). ....                                              | 140 |
| Figura 72 - Morfologia do compósito PEI/fibra de vidro após a soldagem a laser (ampliação de 5x). ....                                                                                                          | 140 |
| Figura 73 - Curvas de polarização da liga AA2024-T3 como recebida, anodizada e após a soldagem pelo processo OFW. ....                                                                                          | 142 |
| Figura 74 - Curvas de polarização da liga AA2024-T3 anodizada e após a soldagem pelo processo a laser. ....                                                                                                     | 142 |
| Figura 75 - Gráfico com os resultados de LSS para ambos os processos. ....                                                                                                                                      | 144 |
| Figura 76 – Comparação dos valores de LSS obtidos para ambos os processos após a otimização dos parâmetros de soldagem e com a liga anodizada. ....                                                             | 144 |
| Figura 77 – Comparação dos valores de microdureza obtidas no estudo. ....                                                                                                                                       | 145 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Uso de ligas convencionais de alumínio na indústria aeronáutica. ....                                                                                                                                                | 32  |
| Tabela 2 - Benefícios da tecnologia de soldagem a laser. ....                                                                                                                                                                   | 46  |
| Tabela 3 – Principais parâmetros do processo por gás quente. ....                                                                                                                                                               | 54  |
| Tabela 4 - Resistência a tração de termoplásticos soldados pelo processo de gás a quente.....                                                                                                                                   | 55  |
| Tabela 5 - Características típicas do gás GLP. ....                                                                                                                                                                             | 55  |
| Tabela 6 - Valores de <i>Lap Shear</i> obtidos de laminados poliméricos soldados com alumínio em encontrados na literatura.....                                                                                                 | 56  |
| Tabela 7 - Composição química nominal da liga AA2024-T351 utilizada no trabalho.....                                                                                                                                            | 64  |
| Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas da liga AA2024-T3. ....                                                                                                                                                             | 64  |
| Tabela 9 - Níveis reais e codificados para as variáveis tempo (s) e distância (mm) da soldagem por OFW, avaliadas segundo planejamento experimental para a junção entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3. .... | 75  |
| Tabela 10 - Níveis reais e codificados para as variáveis potência (W) e velocidade (mm/s) da soldagem por laser, avaliadas segundo planejamento para a junção entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3.....      | 75  |
| Tabela 11 - Resultados preliminares para determinação dos valores máximo e mínimo da soldagem OFW.....                                                                                                                          | 90  |
| Tabela 12 – Resultados preliminares de LSS das amostras soldadas por OFW entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3. ....                                                                                          | 91  |
| Tabela 13 - Parâmetros utilizados no processo a laser por Yb: fibra. ....                                                                                                                                                       | 94  |
| Tabela 14 – Resultados preliminares de LSS da junção compósito/alumínio soldados a laser. ....                                                                                                                                  | 97  |
| Tabela 15 - Resultados de <i>Lap Shear</i> correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para a união da liga AA2024-T3 e compósito PEI/fibra de vidro pelo processo OFW. ....           | 101 |
| Tabela 16 - Resultados de <i>Lap Shear</i> correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para a junção da liga AA2024-T3 e compósito PEI/fibra de vidro pelo processo a laser. ....      | 102 |
| Tabela 17 - Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem por OFW da junção entre a liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro. ....                                                                   | 103 |

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 18 - Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem a laser Yb: fibra da junção entre a liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro. .... | 104 |
| Tabela 19 - Valores de rugosidade, Ra e Rz, com suas respectivas médias e desvio padrão. ....                                                                           | 114 |
| Tabela 20 - Comparações com a literatura do ensaio ILSS realizado com a matriz PEI. ....                                                                                | 115 |
| Tabela 21 - Resultados provenientes da dureza Vickers para a liga como recebida e após a soldagem por OFW.....                                                          | 118 |
| Tabela 22 - Valores de LSS da união entre a liga AA2024-T3 anodizada e o compósito PEI/fibra de vidro obtidos com os parâmetros otimizados. ....                        | 120 |
| Tabela 23 - Resultados provenientes da dureza Vickers para a soldagem a laser Yb: fibra. .                                                                              | 130 |
| Tabela 24 - Resultado proveniente da otimização do processo a laser Yb: fibra. Para condições de um e dois cordões de solda. ....                                       | 134 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |                                          |
|-----------|------------------------------------------|
| AA2024-T3 | <i>Aluminum Alloy 2024 - T3</i>          |
| PEI       | Poli (éter-imida)                        |
| PEEK      | Poli (éter éter cetona)                  |
| PEKK      | Poli (éter cetona cetona)                |
| PPS       | Poli (sulfeto de fenileno)               |
| PA        | Poliamida                                |
| OFW       | <i>Oxi Fuel Welding</i>                  |
| CFRP      | <i>Carbon fiber reinforced polymers</i>  |
| GLP       | Gás Liquefeito de Petróleo               |
| TGA       | Termogravimetria                         |
| LSS       | <i>Lap Shear</i>                         |
| ILSS      | Resistência ao Cisalhamento Interlaminar |

## SUMÁRIO

|          |                                                                       |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                               | <b>21</b> |
| 1.1      | CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....                                          | 21        |
| 1.3      | OBJETIVOS .....                                                       | 23        |
| 1.4      | METODOLOGIA DO TRABALHO .....                                         | 24        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                                    | <b>25</b> |
| 2.1      | MATERIAIS AVANÇADOS PARA UTILIZAÇÃO AEROESPACIAL.....                 | 25        |
| 2.2      | MATERIAIS AVANÇADOS.....                                              | 29        |
| 2.2.1    | <b>Laminados termoplásticos reforçados com fibras contínuas .....</b> | <b>29</b> |
| 2.2.2    | <b>Matriz polimérica PEI.....</b>                                     | <b>30</b> |
| 2.2.3    | <b>Liga AA2024-T3.....</b>                                            | <b>31</b> |
| 2.3      | ANODIZAÇÃO DA LIGA AA2024-T3 .....                                    | 35        |
| 2.4      | ESTRUTURAS HÍBRIDAS .....                                             | 37        |
| 2.5      | SOLDAGEM ENTRE MATERIAIS DISSIMILARES .....                           | 40        |
| 2.5.1.   | <b>Soldagem a laser .....</b>                                         | <b>43</b> |
| 2.5.1.1  | <i>Keyhole .....</i>                                                  | <i>47</i> |
| 2.5.1.2  | Condução Térmica.....                                                 | 48        |
| 2.5.1.3  | Soldagem Laser de Fibra .....                                         | 50        |
| 2.5.2    | <b>Soldagem por gás quente .....</b>                                  | <b>53</b> |
| 2.6      | ESTUDOS DE SOLDAGEM ENTRE ALUMÍNIO-COMPÓSITO .....                    | 56        |
| 2.7      | DEFEITOS ENVOLVIDOS DA SOLDAGEM NA LIGA AA2024-T3 .....               | 57        |
| 2.8      | DEFEITOS EM LAMINADOS.....                                            | 59        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                       | <b>63</b> |
| 3.1      | MATERIAIS.....                                                        | 63        |
| 3.1.1    | <b>Compósito PEI/Fibra de vidro .....</b>                             | <b>63</b> |
| 3.1.2    | <b>Liga AA2024-T351.....</b>                                          | <b>64</b> |
| 3.2      | PROCESSOS DE SOLDAGEM .....                                           | 65        |
| 3.2.1    | <b>Soldagem por Oxi-combustão (OFW) .....</b>                         | <b>65</b> |
| 3.2.1.1  | Dispositivos de soldagem OFW .....                                    | 66        |
| 3.2.2    | <b>Soldagem a laser por Yb: fibra .....</b>                           | <b>71</b> |
| 3.3      | PLANEJAMENTO E ANÁLISES DE EXPERIMENTOS .....                         | 73        |
| 3.4      | ANODIZAÇÃO DA LIGA AA2024-T3 .....                                    | 76        |

|         |                                                                                    |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5     | CARACTERIZAÇÃO DOS LAMINADOS E A LIGA .....                                        | 78  |
| 3.5.1   | <b>Caracterização Mecânica</b> .....                                               | 79  |
| 3.5.1.1 | Ensaio de <i>Lap Shear</i> (LSS) .....                                             | 79  |
| 3.5.1.2 | Ensaio de ILSS (cisalhamento interlaminar) .....                                   | 80  |
| 3.5.2   | <b>Análise óptica</b> .....                                                        | 81  |
| 3.5.2.1 | Macroscopia .....                                                                  | 81  |
| 3.5.2.2 | Microscopia .....                                                                  | 81  |
| 3.5.3   | <b>Termogravimetria (TGA)</b> .....                                                | 82  |
| 3.5.4   | <b>Ensaio de rugosidade</b> .....                                                  | 83  |
| 3.5.5   | <b>Microdureza</b> .....                                                           | 84  |
| 3.5.6   | <b>Ensaio de corrosão pelo método Potenciodinâmico</b> .....                       | 85  |
| 3.5.6.1 | Curva Tafel.....                                                                   | 85  |
| 3.5.6.2 | Análise potenciodinâmica .....                                                     | 87  |
| 4       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                                               | 89  |
| 4.1     | DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM .....                                      | 89  |
| 4.1.1   | <b>Processo de soldagem por OFW</b> .....                                          | 89  |
| 4.1.2   | <b>Soldagem a Laser Yb :Fibra</b> .....                                            | 93  |
| 4.1.3   | <b>Termogravimetria (TGA)</b> .....                                                | 97  |
| 4.1.4   | <b>Aplicação do Planejamento Experimental</b> .....                                | 100 |
| 4.1.4.1 | Avaliação do modelo experimental na soldagem entre o laminado e a liga.....        | 105 |
| 4.2     | EFEITO DA ANODIZAÇÃO NA LIGA AA2024-T3 .....                                       | 110 |
| 4.2.1   | <b>Liga AA2024-T3 como recebida</b> .....                                          | 110 |
| 4.2.2   | <b>Anodização da liga AA2024-T3</b> .....                                          | 111 |
| 4.3     | ENSAIO DE RUGOSIDADE .....                                                         | 113 |
| 4.4     | VIABILIDADE DO ENSAIO DE ILSS EM JUNTAS SOLDADAS<br>DISSIMILARES .....             | 114 |
| 4.5     | SOLDAGEM POR OFW .....                                                             | 117 |
| 4.5.1   | <b>Influência da chama GLP na soldagem OFW na liga AA2024-T3</b> .....             | 117 |
| 4.5.2   | <b>Análise microestrutural da união do laminado e a liga pelo processo OFW</b> ... | 120 |
| 4.6     | PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER POR YB: FIBRA .....                                   | 126 |
| 4.6.1   | <b>Métodos de soldagem a laser Yb: Fibra</b> .....                                 | 126 |
| 4.6.2   | <b>Influência do processo de soldagem a laser na liga AA2024-T3</b> .....          | 130 |
| 4.6.3   | <b>Otimização do processo de soldagem a laser</b> .....                            | 133 |

|       |                                                                               |            |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.6.4 | Caracterização da união entre o laminado e a liga pelo processo a laser ..... | 135        |
| 4.7   | ANÁLISE POTENCIODINÂMICA .....                                                | 141        |
| 4.8   | COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM DE ESTUDO....                      | 143        |
| 5     | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                        | <b>146</b> |
| 5.1   | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                        | 148        |
| 5.2   | PRODUÇÕES CIENTÍFICAS GERADAS .....                                           | 148        |
|       | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                      | <b>149</b> |
|       | <b>APÊNDICES .....</b>                                                        | <b>164</b> |
|       | <b>ANEXOS .....</b>                                                           | <b>170</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, a indústria aeroespacial vem utilizando diversos tipos de compósitos para atender às suas necessidades de redução de peso, bem como melhorar os tempos de fabricação e economizar custos. Desta forma, diferentes tipos de compósitos estão sendo desenvolvidos para atender a essas necessidades e, conseqüentemente, tornando como importante fator investimentos em novas tecnologias de processamento e manutenção envolvendo estes materiais (HOLMES, 2017; PRUDHOMME et al., 2018).

O uso de compósitos de matriz polimérica para aplicações estruturais está se expandindo rapidamente, principalmente devido à sua elevada relação rigidez/peso e resistência à corrosão. Para aplicações estruturais, o maior requisito em um compósito estrutural é um alto nível de propriedades mecânicas que, por sua vez, depende em grande parte da adesão interfacial da fibra/matriz (SEYYED MONFARED ZANJANI; AL-NADHARI; YILDIZ, 2018).

O aumento constante no uso de compósitos de fibras de vidro e de carbono trouxeram mudanças significativas nas indústrias aeroespaciais. A aplicação constante desses materiais em diversos campos da engenharia, onde muitas pesquisas e desenvolvimentos de suas propriedades deram um valor agregado a esses materiais, estão se tornando cada vez mais comuns devido às suas excelentes propriedades mecânicas (VIJAY; RAJKUMARA; BHATTACHARJEE, 2016).

Os elevados valores de resistência específica e rigidez dos compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas os tornam uma escolha atraente como materiais para uso em estruturas aeronáuticas leves e de alto desempenho. Os benefícios adicionais incluem a capacidade de produzir geometrias complexas, que resultam em menor montagem de peças com menos operações de montagem e junção (KHALED; MEHDI, 2017).

Dentre as matrizes termoplásticas atualmente mais utilizadas para aplicações aeroespaciais, o PEI é considerado um excelente candidato para uso como matriz em compósitos avançados, devido às suas excelentes resistência mecânica e rigidez em altas temperaturas, elevada resistência ao calor, boas propriedades elétricas e resistência química adequada (REIS et al., 2018).

Com a finalidade de melhorar a economia de combustível e reduzir as emissões ambientais, os materiais atualmente utilizados nas indústrias de transporte estão mudando de

aços com baixo teor de carbono para uma combinação de ligas leves de alta resistência mecânica. Esta substituição inclui a utilização de ligas de alumínio e de magnésio e compósitos constituído de fibras contínuas e matriz polimérica, que fornecem um meio eficiente para reduzir a massa da estrutura do veículo. Métodos tradicionais de montagem, tais como juntas mecânicas usando parafusos ou rebites, e ligação química por adesivos, são geralmente utilizados no campo da engenharia. No entanto, esses métodos apresentam algumas desvantagens tais como: geram concentrações de tensão em torno de saliências de parafusos ou rebites, aumentos no peso estrutural devido a componentes da junta ou tempo longo de cura dos sistemas adesivos (GOTO et al., 2019; MARIAM et al., 2018; THAI et al., 2018).

A união por soldagem representa um fator chave para aumentar a utilização de compósitos termoplásticos em muitos setores industriais e, especialmente, nas aplicações aeroespaciais, proporcionando uma rota de montagem mais rápida para peças complexas em comparação com ligações de adesão, redução de peso em comparação aos métodos de junção por rebite, que são comumente utilizados em uso demasiado nos compósitos termorrígidos. As estruturas constituídas de materiais que apresentam excelente resistência e relação rigidez/peso, muito comuns em componentes aeronáuticos, principalmente sujeitas a cargas de cisalhamento e cisalhamento por flexão, podem se beneficiar de processos de soldagem para determinada integrações estruturais, mantendo um desempenho adequado e eficiente em sua vida útil (PAPPADÀ et al., 2015).

A adoção da soldagem em materiais dissimilares nas estruturas representa uma solução para reduzir o peso e o consumo de combustível e melhorar o desempenho dos veículos, pois reduz a utilização de rebites, comumente utilizados na interação entre materiais dissimilares presentes nas estruturas, que ocasiona o aumento do peso dos veículos. Conceitos de estruturas leves exploram as características de diferentes materiais caracterizados por diferentes comportamentos físicos e mecânicos (LAMBIASE; DURANTE; ILIO, 2016; LIONETTO; BALLE; MAFFEZZOLI, 2017).

Em um cenário em que poucas referências relacionadas a soldagem para a junção entre metal/polímero são encontradas, a soldagem por OFW torna-se de grande interesse, uma vez que este consiste em um método alternativo, inovador e com baixo custo para uma junção complexa.

Desta forma, neste trabalho de pesquisa amostras de alumínio 2024-T3 e de compósitos poliméricos foram soldadas em dois processos diferentes, sendo estes a partir do processo de soldagem por Oxi-combustão (OFW), baseando-se na soldagem a gás quente, e soldagem por

laser (realizados por condução térmica). Os resultados obtidos a partir destas duas técnicas foram comparados entre si.

## 1.2 INOVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho de doutorado é a avaliação da viabilidade do emprego da soldagem por laser Yb: fibra e por Oxi-combustão (OFW), visando a integração entre o laminado PEI/fibra de vidro e alumínio 2024-T3 para aplicações aeronáuticas. Estes materiais possuem características químicas e físicas distintas, portanto, a inovação desse estudo encontra-se na aplicabilidade de processos de soldagem alternativos para uma junção complexa que envolvam esses materiais. Associado a este fato, a soldagem a laser é um processo em que há poucos relatos na literatura para a junção de materiais aeronáuticos dissimilares e a soldagem OFW é um processo inédito visando esse objetivo, com baixo custo e fácil aplicabilidade. Adicionalmente foi realizado um estudo sistemático envolvendo o estabelecimento das variáveis mais adequadas (potência e velocidade para a soldagem a laser e tempo e distância para a soldagem OFW) por planejamento experimental e na avaliação de uma prova de conceito envolvendo a caracterização dos materiais de estudo.

A realização deste estudo contribuirá para o desenvolvimento de novas tecnologias de utilização e fabricação em escala industrial na área de integração de estruturas, principalmente do setor aeronáutico.

## 1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo associado a este trabalho consiste no desenvolvimento e otimização da soldagem entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga de alumínio AA2024-T3 a partir de dois processos de soldagem: por Oxi-combustão (OFW) e a laser Yb: fibra. Como objetivos específicos destacam-se:

- otimização dos parâmetros aplicados nos processos de soldagem estabelecendo as melhores condições de soldagem;
- desenvolvimento e estudos de métodos para o aumento da interação entre alumínio e compósitos estruturais;

- avaliação da caracterização mecânica (LSS e ILSS) das juntas soldadas e avaliação microestrutural da interação entre os materiais dissimilares soldados (macroscopia e microscopia óptica);

- levantamento de uma base de dados com propriedades resultantes da soldagem entre ligas de alumínio e compósitos poliméricos estruturais.

#### 1.4 METODOLOGIA DO TRABALHO

A apresentação desta tese de doutorado encontra-se dividida em 6 capítulos como se segue:

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o tema da tese e os objetivos propostos neste trabalho.

No Capítulo 2, Revisão da literatura, é apresentada uma revisão sobre o estado da arte em compósitos e alumínio aplicados na indústria aeronáutica, compósitos termoplásticos, liga de alumínio 2024-T3, soldagem entre de alumínio e termoplásticos, principais características mecânicas do laminado e da liga de alumínio 2024-T3 em estudo, características e fundamentos principais dos processos de soldagem por laser e por gás quente, caracterizando seus principais defeitos provenientes da soldagem.

O Capítulo 3, denominado Materiais e Métodos apresenta a parte experimental desenvolvida na execução deste trabalho. Nesta tese, as seguintes etapas dos experimentos realizados serão apresentadas:

- Detalhes dos equipamentos e métodos de soldagem utilizados;
- Materiais e procedimentos utilizados;
- Preparação dos corpos de provas para os ensaios realizados.

O capítulo 4, intitulado, Resultados e Discussão, apresenta a discussão dos principais resultados provenientes das análises estatísticas, mecânicas, por macroscopia e microscopia e o estudo eletroquímico.

No Capítulo 5, denominado Conclusão, encontram-se apresentadas as principais conclusões formuladas, sugestões para trabalhos futuros e a produção científica gerada diretamente relacionada com este trabalho de pesquisa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 MATERIAIS AVANÇADOS PARA UTILIZAÇÃO AEROESPACIAL

O crescimento da indústria aeroespacial impulsiona o rápido desenvolvimento de novos materiais para aeronaves. A principal força motriz para isto é a redução de custos a partir da diminuição de peso para economia de combustível e, adicionalmente, extensão da vida útil das peças e estruturas das aeronaves (M'SAOUBI et al., 2015; ZHANG; CHEN; HU, 2018).

As pressões comerciais para melhoria contínua no desempenho do motor e eficiência de combustível têm impulsionado o desenvolvimento de materiais com limites crescentes de temperatura a um custo acessível (DURSUN; SOUTIS, 2014). Isto é evidente a partir da evolução da composição de materiais em motores, com a tendência de evoluir para ligas com maior capacidade de temperatura (de aços ao níquel e ligas de titânio) e materiais com menor densidade (compósitos reforçados com fibras contínuas e ligas de alumínio) (DURSUN; SOUTIS, 2014; ZHANG; CHEN; HU, 2018).

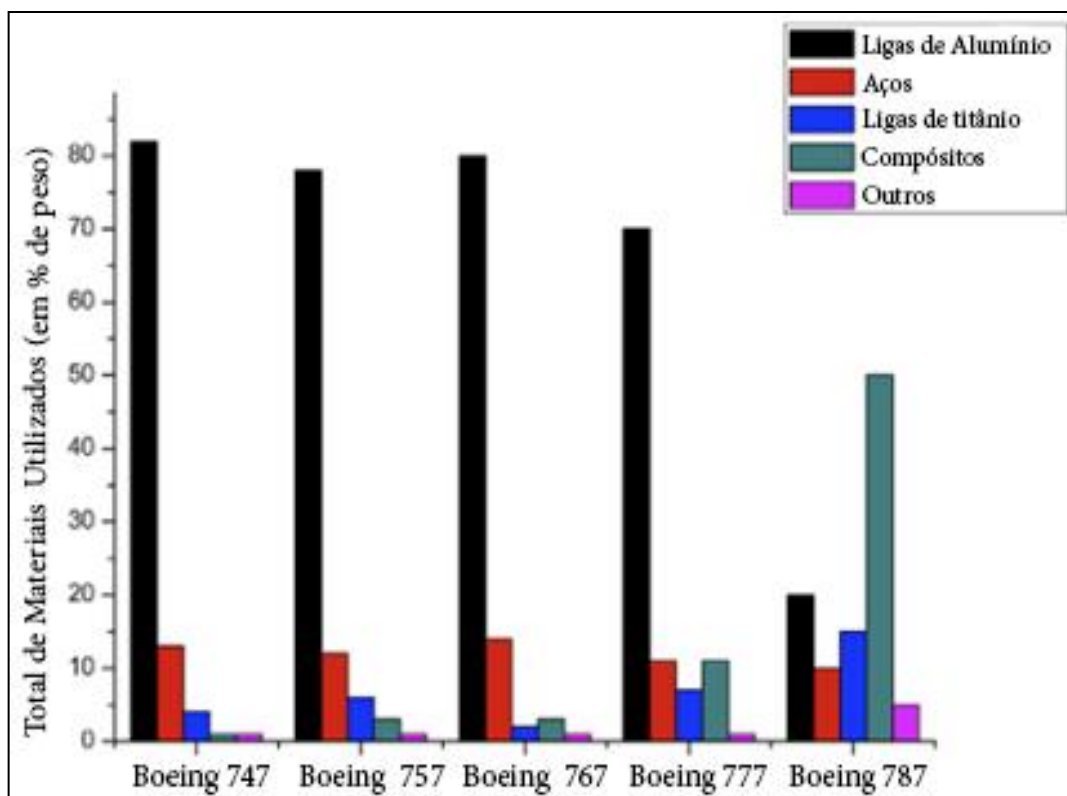
Várias combinações de novas classes de materiais com métodos de processamento avançados devem ser avaliadas para obter um componente com propriedades aprimoradas para várias aplicações de engenharia (ANTHONY XAVIOR et al., 2018). Dessa forma, ao longo dos anos, fabricantes aeroespaciais estão continuamente se esforçando para reduzir o peso da estrutura das aeronaves, visando estruturas de alta rigidez envolvendo materiais compósitos poliméricos (MARIAM et al., 2018).

Nas últimas décadas, os compósitos termoplásticos tornaram-se cada vez mais interessantes para o seu uso em estruturas de aeronaves devido às razões de altas propriedades mecânicas específicas em comparação com os metais e processo de fabricação de baixo custo, maior tenacidade à fratura e grande potencial de reciclagem em comparação aos compósitos termorrígidos (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; ZHAO et al., 2017).

Peças estruturais leves, como aquelas constituídas de compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas, são atraentes para uso em projeto e fabricação em indústrias aeroespaciais, pois podem proporcionar uma redução de 20 a 30% no peso total, além de 25% na redução do custo final (M'SAOUBI et al., 2015; MARIAM et al., 2018; REZENDE, 2007). Em consequência disso, nos últimos 20 anos tem ocorrido um grande crescimento na utilização de materiais compósitos avançados com matrizes poliméricas reforçadas com fibra de carbono e de vidro para componentes de estruturas aeronáuticas (M'SAOUBI et al., 2015; REZENDE,

2007; WANG et al., 2009). Diante deste panorama, a área que envolve a aplicação de compósitos têm experimentado um rápido crescimento, devido principalmente ao aumento na quantidade de materiais nos modelos mais recentes da *Boeing*, como apresentado pela Figura 1, onde se observa a quantidade em % de peso de materiais utilizados nas aeronaves da série *Boeing* (ZHANG; CHEN; HU, 2018).

Figura 1 - Quantidade de materiais utilizados em aeronaves da série Boeing.



Fonte: Adaptado de Zhang, Chen e Hu (2018).

Essa evolução na utilização dos compósitos na indústria aeroespacial, apresentada na Figura 1, pode ser explicada devido ao grande desenvolvimento desses materiais, onde as indústrias de aeronaves exigem materiais que tenham excelentes propriedades mecânicas, tais como elevada rigidez e baixo peso (ANTHONY XAVIOR et al., 2018; ASHWATH et al., 2018; PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012).

Em 2014, foram utilizadas aproximadamente 1680 toneladas de materiais compósitos, no valor de mais de US \$ 1,1 bilhão, em componentes de motores. Essa estimativa chegará a 2665 toneladas de compósitos, totalizando um valor de US \$ 1,7 bilhão, até 2023 (RED, 2015).

Os materiais compósitos têm sido utilizados na indústria aeroespacial em peças estruturais primárias e secundárias, incluindo fundições de motores de foguetes, caixas de asa

central, asas de aeronaves, anteparos de pressão, portas de trem de pouso, capas de motor, vigas do assoalho, estabilizadores verticais e horizontais (RANA; FANGUEIRO, 2016).

A constante mudança da tecnologia de materiais aeronáuticos é outro fator que estenderá consideravelmente os limites/capacidades dos processos de fabricação estabelecidos e, portanto, enfatiza ainda mais a necessidade crítica de desenvolver técnicas de produção mais avançadas e robustas (DURSUN; SOUTIS, 2014).

A indústria aeroespacial tem experimentado um crescimento significativo na última década e estima-se que em 2030 serão necessárias quase 30.000 novas aeronaves comerciais de passageiros para atender à crescente demanda global. Espera-se que o crescimento nas entregas de novas aeronaves esteja em uma média de 3,6% ao ano até 2030 (DURSUN; SOUTIS, 2014; KAPPMAYER et al., 2012; KLOCKE et al., 2015).

A redução de custos, para compra e operação de aeronaves, tornou-se uma força motriz na produção e utilização de aeronaves civis. Essa redução pode ser obtida diminuindo o consumo de combustível, o custo de manutenção, os custos operacionais, redução da frequência do reparo e, conseqüentemente, aumentando-se sua vida útil (DURSUN; SOUTIS, 2014; FERNANDEZ VILLEGAS; VIZCAINO RUBIO, 2015; M'SAOUBI et al., 2015; REZENDE, 2007; ZHANG; CHEN; HU, 2018).

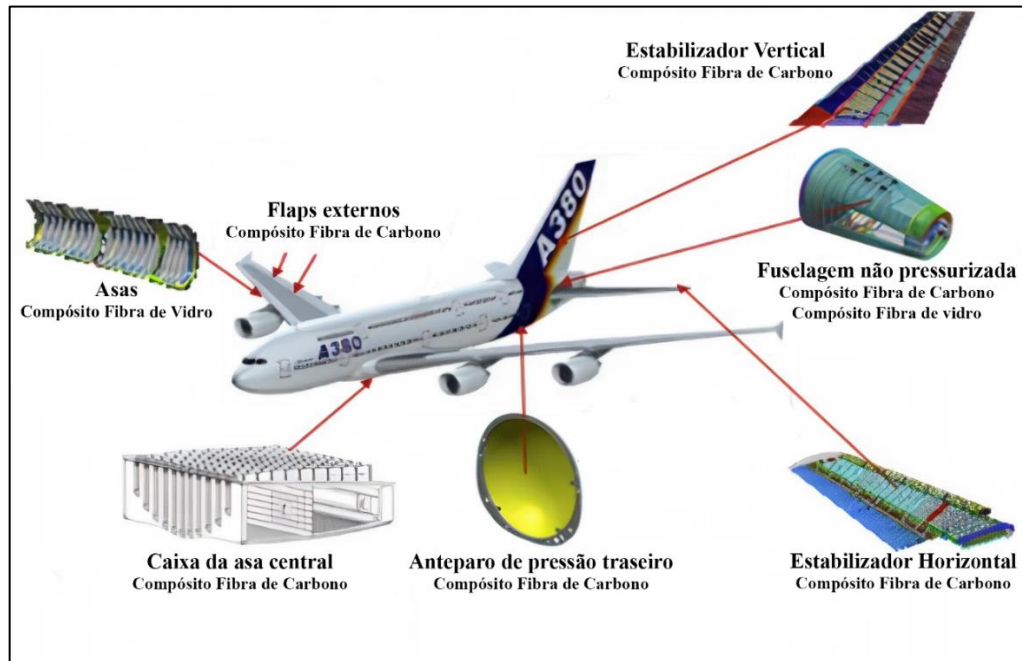
A empresa *Airbus* está desenvolvendo aeronaves em que a presença de compósitos seja bastante significativa devido a suas propriedades já citadas. A Figura 2 apresenta os principais usos de materiais compósitos na aeronave *Airbus A380*, sendo observada presença de compósitos reforçados com fibras de carbono e vidro em diversas estruturas desta aeronave (KHALED; MEHDI, 2017).

A redução de peso pode melhorar o consumo de combustível, aumentar a carga útil e aumentar o alcance de voo. Além disso, propriedades mecânicas aprimoradas e otimizadas dos materiais podem resultar em aumento do período para manutenção e reduzir os custos de reparo (DURSUN; SOUTIS, 2014).

De acordo com a literatura, é visto que uma maneira eficaz de diminuir o peso da aeronave é reduzindo a densidade do material. Verifica-se que a diminuição da densidade é cerca de 3 a 5 vezes mais eficaz do que o aumento da resistência à tração, do módulo de elasticidade ou da tolerância a danos numa estrutura aeronáutica. A durabilidade da estrutura é outro parâmetro que afeta diretamente os custos (DURSUN; SOUTIS, 2014; ZHANG; CHEN; HU, 2018). Neste caso, a seleção de materiais para o projeto de uma aeronave depende dos requisitos de projeto de cada componente, incluindo condições de carregamento, manufaturabilidade, limites

geométricos, a relação entre a propriedade mecânica selecionada e a densidade do material, aspectos ambientais e facilidade de manutenção (MASOUMI KHALILABAD et al., 2018; ZHANG; CHEN; HU, 2018).

Figura 2 - Uso de compósitos na aeronave da Airbus A380.



Fonte: Adaptado de Zhang, Chen e Hu (2018).

A seleção de materiais em estruturas aeronáuticas tem seu próprio critério e design específico para qual ele será aplicado. Por exemplo, a asa é submetida a esforços de flexão durante o voo, portanto, deve suportar o peso estático da aeronave e as cargas dinâmicas devido a manobras ou turbulência. Sendo assim, a superfície superior da asa está sob compressão e tensão durante o voo, enquanto a superfície inferior está sob as cargas opostas, sendo que isto requer que os materiais da asa forneçam alta resistência à tração e alta resistência à compressão. Além disso, o desgaste por atrito acelera a falha por fadiga dos componentes que pode causar o início da propagação de trincas na superfície do material. No entanto, a teoria geral que identifica o comportamento de atrito e a sua prevenção ainda não está clara na literatura (DURSUN; SOUTIS, 2014; ZHANG; CHEN; HU, 2018).

Um dos problemas também relacionados a utilização de materiais metálicos em aplicação aeronáutica é o de corrosão, causando uma perda estimada de US \$ 276 bilhões por ano nos EUA, o que é muito maior do que o prejuízo causado por desastres naturais (ZHANG; CHEN; HU, 2018).

## 2.2 MATERIAIS AVANÇADOS

Segundo Lastres (1994), os materiais avançados são materiais que, em resultado de desenvolvimentos inovadores em projeto, técnicas de produção e/ou de processamento, apresentam novas estruturas com superiores propriedades.

O desenvolvimento industrial tem exigido ao longo dos anos materiais mais aprimorados, com características de maior resistência a corrosão e leveza comparados aos aços. Neste cenário, ligas de alumínio de alta resistência e materiais compósitos têm-se destacado para diversas aplicações, sendo que, particularmente os materiais compósitos vêm se destacando como materiais de elevado nível de desenvolvimento nas últimas décadas (MARINUCCI, 2011).

### 2.2.1 Laminados termoplásticos reforçados com fibras contínuas

Atualmente, os compósitos termoplásticos reforçados com fibras desempenham um papel importante como materiais estruturais na indústria aeroespacial, bem como nas indústrias automotiva, de construção naval, submarinos, indústrias e instalações nucleares e químicas (ALTABEY; NOORI, 2017; KHAN, 2019).

A utilização crescente de compósitos poliméricos na indústria aeroespacial é principalmente devido à sua maior resistência específica e maior resistência à corrosão e a fadiga do que a maioria dos metais e ligas aplicadas em estruturas (DURSUN; SOUTIS, 2014; KHALED; MEHDI, 2017; KHAN, 2019; ZHANG; CHEN; HU, 2018). Especialmente em aplicações aeroespaciais, onde o fator peso é uma preocupação importante, os compósitos poliméricos oferecem uma excelente propriedades mecânicas específicas sobre os metais, tornando-se assim uma alternativa viável e eficiente (KHALED; MEHDI, 2017; VIJAY; RAJKUMARA; BHATTACHARJEE, 2016).

Nas últimas décadas, as propriedades mecânicas dos laminados termoplásticos com aplicações estruturais atingiram um nível tão bom quanto, se não melhor, que os compósitos termorrígidos, o que faz com que os compósitos termoplásticos sejam cada vez mais utilizados na indústria aeronáutica (PAPPADÀ et al., 2015; SHI; VILLEGAS; BERSEE, 2013).

O interesse no desenvolvimento de compósitos termoplásticos também é impulsionado pelo aumento da tolerância a danos, alta resistência a impactos, resistência a produtos químicos e solventes, baixos custos de armazenamento e reciclagem (FARAHANI; DUB, 2017;

FERNANDEZ VILLEGAS; VIZCAINO RUBIO, 2015; KHALED; MEHDI, 2017; SHI et al., 2015).

Além disso, outro fator da crescente utilização de compósitos termoplásticos nas indústrias aeroespaciais está em sua possibilidade em ser soldado. Isso se deve à propriedade intrínseca das matrizes termoplásticas, podendo ser fundidas ao serem aquecidas. Apesar da fusão provocar a redução da massa molecular, os termoplásticos retem suas propriedades mecânicas originais após o resfriamento (ZHAO et al., 2017). A união por fusão em termoplásticos elimina os problemas comuns relacionados à adesão de sistemas adesivos, tais como longos tempos de cura e a necessidade de uma preparação de superfície extensa, bem como possíveis delaminações e concentrações de tensão que podem ocorrer na fixação mecânica e, conseqüentemente, o aumento do peso da estrutura (FARAHANI; DUB, 2017; GOTO et al., 2019).

Em consequência dos fatos citados, matrizes termoplásticas de elevado desempenho tais como o PPS [poli (sulfeto de fenileno)], PEI [poli (éter-imida)], PEEK [(poli (éter éter cetona)], e PEKK [(poli (éter cetona cetona))] estão sendo aplicadas em materiais compósitos estruturais avançados, principalmente aqueles reforçados com fibras que contribuem significativamente para a redução de peso e o aumento da resistência à corrosão (FARIA; CIOFFI; BOTELHO, 2012; VIJAY; RAJKUMARA; BHATTACHARJEE, 2016).

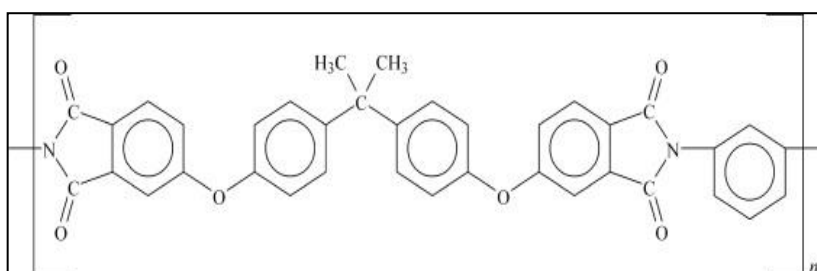
### **2.2.2 Matriz polimérica PEI**

As matrizes termoplásticas de engenharia tais como o PEI [poli (éter-imida)], PA (poliamidas), e PEEK [poli (éter éter cetona)], estão ganhando grande atenção em vista de muitas aplicações de engenharia. Dentre esses polímeros, o PEI se destaca, sendo este um termoplástico de engenharia amorfo de alto desempenho, possuindo excelentes propriedades mecânicas, mesmo a temperaturas elevadas. Além disso, quando comparado com outras matrizes poliméricas, o PEI apresenta uma elevada temperatura de transição vítrea (~216–220 °C) (KUMAR et al., 2007, CACCIOTTI et al., 2018).

Devido a essas características, o PEI é empregado como matriz de compósitos em partes de estruturas de aeronaves (painéis de assoalho, iluminação, assentos, etc.), sobressaindo como matriz de compósitos termoplásticos em função de seus custos, propriedades físicas e químicas e a facilidade de manuseio e produção (FILHO, 2011; OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009).

As poli (éter-imidas) são basicamente polímeros combinados, consistindo em unidades de éter e grupos imida em sua cadeia polimérica. Essa matriz possui unidades imidas aromáticas que resultam em elevadas rigidez e resistência ao calor, e os grupos de movimentação de cadeia, como o oxigênio entre as cadeias aromáticas [-O- e (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>], funcionam como cadeias flexíveis e resultam em uma boa processabilidade (ZHANG et al., 2015; DAWKINS; GRUENDER; COPELAND, 2014). A Figura 3 ilustra a estrutura do PEI (MCKEEN, 2010).

Figura 3 - Estrutura do Poli (éter-imida).



Fonte: Mckeen (2010).

### 2.2.3 Liga AA2024-T3

Nos últimos anos, as ligas de alumínio têm envolvido o interesse de muitos pesquisadores e engenheiros como um material estrutural capaz de ser aplicado em diferentes setores, como aplicações aeroespaciais e automotivas (ASHWATH et al., 2018).

As ligas de alumínio são amplamente empregadas na indústria aeroespacial, pois a redução de peso é uma das formas mais eficazes para se aumentar a eficiência e melhorar o consumo de combustível, reduzindo consideravelmente seu custo estrutural. Além disso, estas ligas são consideradas eficientes nesses tipos de situações, visto que oferecem um compromisso ideal de propriedades mecânicas, peso e resistência à corrosão (ALFIERI; CAIAZZO; SERGI, 2015; DITTRICH et al., 2011).

Entretanto, as ligas de alumínio ainda permanecem como importantes materiais estruturais devido às suas diversas vantagens, como baixo custo, fácil fabricação, baixa densidade, resistência à corrosão, condutividade térmica, etc., podendo estas serem tratadas e expostas a carregamentos a um nível relativamente alto de tensões (KUMAR; XAVIOR, 2017; ZHANG; CHEN; HU, 2018). As ligas de alumínio têm uma ampla gama de aplicações devido à sua elevada resistência à corrosão, ao escoamento e à fadiga (MARIAM et al., 2018; MOY et al., 2012). A fuselagem de aeronaves é geralmente exposta às condições de alta pressão e

cargas de cisalhamento, e requer que os materiais possuam alta resistência à tração e resistência ao cisalhamento, ou seja, as ligas de alumínio são consideradas como materiais estruturais (KUMAR; XAVIOR, 2017; ZHANG; CHEN; HU, 2018).

Dentre as ligas de alumínio utilizadas em aeronaves, as da série 2xxx possuem maior tolerância a danos, e melhores resistência à fadiga e tenacidade à fratura do que as ligas de série 7xxx. As ligas da série 2xxx são obtidas com cobre e tratadas termicamente com uma resistência comparável à do aço (AHN et al., 2018). A Tabela 1 apresenta os principais usos de ligas de alumínio na indústria aeronáutica (RAMBABU et al., 2017).

Tabela 1 - Uso de ligas convencionais de alumínio na indústria aeronáutica.

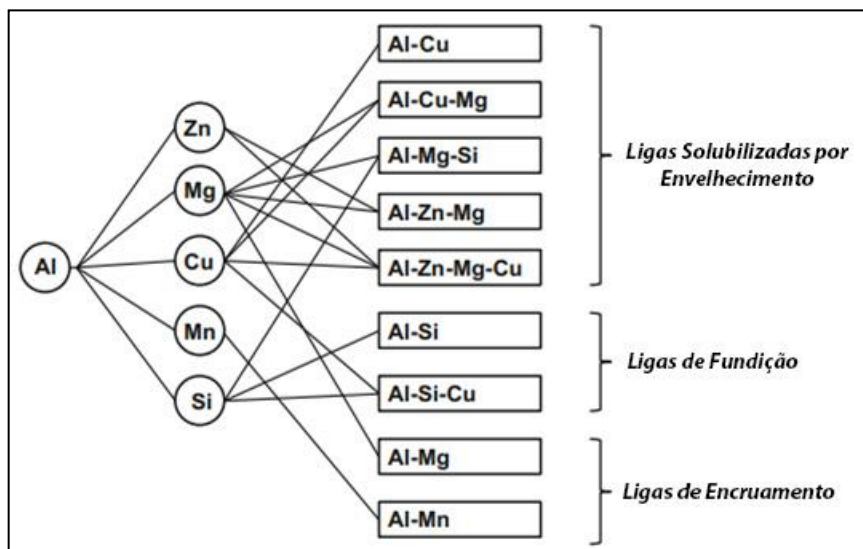
| Produto          | Características    | Ligas                                                       | Aplicação                                                                |
|------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>Chapas</b>    | Tolerância a danos | 2024-T3;<br>2524-T3/351.                                    | Fuselagem, Proteção da Cabine de pressão                                 |
| <b>Placas</b>    | Tolerância a danos | 2024-T351;<br>2324-T39;<br>2624-T351;<br>2624-T39.          | Proteção da asa inferior                                                 |
|                  | Resistência Média  | 2024-T62.                                                   | Painéis de fuselagem de aeronaves                                        |
|                  | Resistência Média  | 2124-T851.                                                  | Anteparas de aeronaves                                                   |
|                  | Resistência Média  | 7050-T7451;<br>7X75-T7XXX.                                  | Estruturas de fuselagem interna                                          |
|                  | Alta Resistência   | 7150-T7751;<br>7055-T7751;<br>7055-T7951;<br>7255-T7951.    | Proteção da asa superior                                                 |
|                  | Resistência Média  | 7050-T7451.                                                 | <i>Spars</i> e nervuras da asa, outras estruturas internas               |
| <b>Forjados</b>  | Alta Resistência   | 7175-T7351;<br>7050-T7452.                                  | Ligações de asas/fuselagem                                               |
| <b>Extrusões</b> | Dano Tolerante     | 2024-T3511;<br>2026-T3511;<br>2024-T4312;<br>6110-T6511.    | Longarinas de asa inferior/fuselagem                                     |
|                  | Dano Tolerante     | 7075-T73511;<br>7075-T79511;<br>7150-T6511;<br>7175-T79511; | Longarinas Fuselagens/asa superior, trilhos de assento, vigas do acoelho |

Fonte: Rambabu et al. (2017).

Considerando as vantagens proporcionadas por sua composição química, a liga AA2024-T3 é amplamente utilizada na estrutura e no projeto de aeronaves, devido às suas elevadas propriedades mecânicas específicas, pela alta relação resistência/peso, excelente capacidade de moldagem, possuindo uma excelente resistência à tração, bem como alta ductilidade, resistência à fadiga e tenacidade à fratura em temperaturas elevadas, tendo um comportamento de solubilização por envelhecimento de alta qualidade e capacidade de tolerância a danos (ALEXOPOULOS et al., 2016; ZHANG; CHEN; HU, 2018). A Figura 4 apresenta os principais tipos de ligas de alumínio, com seus devidos elementos que a compõem e tratamento que podem ser realizados.

Em ligas de alumínio e cobre é comum encontrar a sigla “T3” em suas especificações, ou seja, são ligas que são tratadas termicamente e envelhecidas naturalmente para alcançar endurecimento e resistência significativos (ILMAN, 2014). Enquanto o alumínio puro não é suscetível à trinca, devido à ausência do baixo ponto de fusão eutético no contorno de grão, a adição de elementos de liga como cobre, magnésio e silício na liga AA2024-T3 faz com que sua composição seja suscetível a trincas, devido principalmente a essa característica anisotrópica (AHN et al., 2017a; LIU et al., 2015).

Figura 4 - Os principais tipos de ligas de alumínio.



Fonte: Rambabu et al. (2017).

A liga de alumínio da série 2xxx é uma liga de Al-Cu-Mg que é desenvolvida exigindo melhores propriedades transversais (por exemplo, tenacidade à fratura e ductilidade), resistência relativamente alta, boas resistências à corrosão e à fluência a temperaturas elevadas.

Essas características dependem da precipitação de fases estáveis e metaestáveis durante o tratamento de endurecimento por envelhecimento (LIN et al., 2012).

O endurecimento por precipitação é o principal mecanismo de fortalecimento para ligas de alta resistência, e os tipos de fase de precipitação dependem do conteúdo dos elementos de liga. Para a liga Al-Cu-Mg, os tipos de precipitados costumam aparecer na razão Cu/Mg. Quando o teor do elemento Mg é baixo, o principal precipitado é a fase  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) e as quantidades da fase  $\theta$  diminuem com o aumento do teor do elemento Mg. Quando o elemento Mg é aumentado até certo ponto, o principal precipitado será a fase S ( $Al_2CuMg$ ), que possui excelente resistência a altas temperaturas (CAVALCANTE; DA SILVA, 2017; LIN et al., 2013). Ainda que essas partículas insolúveis sejam duras e frágeis, sua precipitação promove um maior endurecimento da liga se suas quantidade e distribuição tenderem a homogeneidade (CAVALCANTE; DA SILVA, 2017; LIN et al., 2013).

Como relatado por Lin et al. (2013), quando a razão Cu/Mg se encontra entre 4% e 8% os principais precipitados são as fases S ( $Al_2CuMg$ ) e  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ); quando a relação de Cu/Mg diminui para 1,5% e 4%, o principal precipitado é a fase S. A liga AA2024-T3 utilizada nesse estudo possui 4,70% de Cu e 1,52 de Mg, sendo a fase S o principal precipitado.

Segundo Caiazza et al. (2013), as propriedades mecânicas nas ligas de alumínio não dependem apenas dos elementos de liga, mas também do tratamento térmico o qual esse material foi submetido. Em relação a liga AA2024-T3 do estudo, T3 é uma designação que se aplica a ligas que são trabalhadas a frio, cuja resistência é melhorada após o tratamento térmico por solução (com a precipitação da fase S). As propriedades mecânicas então são estabilizadas pelo envelhecimento à temperatura ambiente. O aumento da resistência na liga base é devido à adição de magnésio e precipitados finamente dispersos após os tratamentos térmicos de envelhecimento.

Com o aumento da utilização e do tempo de serviço, o problema da corrosão atmosférica em estruturas de liga de alumínio de aeronaves tem se tornado cada vez mais importante, principalmente para componentes em que são expostos a ambientes corrosivos (CHEN et al., 2019; ZHANG et al., 2019).

De fato, os danos de corrosão acumulados durante a vida útil representam uma grande ameaça para as estruturas de alumínio e, portanto, a avaliação da corrosão é uma questão significativa para avaliar a integridade estrutural de uma aeronave envelhecida, por exemplo (PANTELAKIS; CHAMOS; KERMANIDIS, 2012; PETROYIANNIS et al., 2004). Além

disso, a liga é suscetível a ataques localizado, resultando em corrosão por pite, corrosão intergranular e corrosão sob tensão (SHI et al., 2013).

A avaliação do dano de corrosão acumulado durante o serviço de uma estrutura depende do tipo de dano de corrosão e é feita principalmente envolvendo quantidades como a perda de massa, a espessura da camada dos produtos de corrosão ou características metalográficas como profundidade, densidade e forma da corrosão (PANTELAKIS; CHAMOS; KERMANIDIS, 2012).

Em relação a liga AA2024-T3, a presença de Cu e Fe tornam a liga suscetível à corrosão localizada na forma de pite e corrosão intergranular (ZHANG; FRANKEL, 2003). Embora a contribuição de Cu e Mg nas fases intermetálicas resulta em alta resistência no entanto, devido às partículas da fase intermetálica, a resistência à corrosão da liga cai significativamente (DURSUN; SOUTIS, 2014).

Em geral, a suscetibilidade à corrosão localizada aumenta com o conteúdo de Cu, um efeito que é atribuído à presença de células galvânicas que se formam entre as partículas ricas em Cu precipitadas e a matriz de alumínio (LOPEZ-GARRITY; FRANKEL, 2013; SCHMUTZ; FRANKEL, 1998).

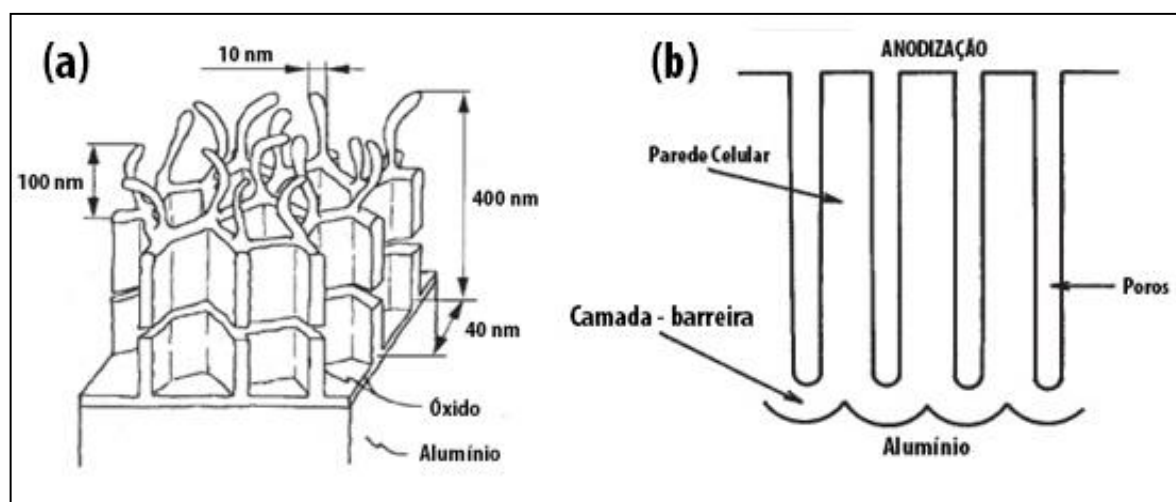
### 2.3 ANODIZAÇÃO DA LIGA AA2024-T3

Como relatado por Ageorges e Ye (2001), o mecanismo de ligação entre o polímero e o metal baseia-se no intertravamento entre o PEI com a microporosidade da camada de óxido de superfície criada no substrato de alumínio pela anodização, ou seja, a tendência é uma maior aderência efetiva na junção por soldagem no compósito PEI/fibra de vidro com a liga AA2024-T3 anodizada. Por este processo, o metal se interliga com o polímero sobreposto para formar uma ligação muito mais forte do que é possível com um óxido “liso”. A Figura 5 (a) representa essa camada de óxido de superfície criada visando uma melhor aderência, sendo no meio metalúrgico conhecido este fenômeno como melhor “diluição”, com o polímero PEI. A Figura 5 (b) exhibe a camada porosa, que consiste em uma fina camada-barreira muito próxima abaixo das paredes celulares dos poros espessos estreitamente compactados.

Analisando a Figura 5, a camada anódica, formada espontaneamente quando é exposta a meios oxidantes (ar e água), é composta por duas partes. Uma é um filme anódico composto por uma fina camada de óxido compacta (isto é, não porosa), que é contínua sobre a superfície da liga; a camada geralmente tem cerca de 10-50 nm de espessura. Esta possui estrutura amorfa

e está presente entre o metal e a camada porosa (HABAZAKI et al., 1997; TSANGARAKI-KAPLANOGLU et al., 2006).

Figura 5 – a) Camada de óxido ( $Al_2O_3$ ) criada pela anodização na superfície da liga AA2024-T3; b) Diagrama esquemático de uma seção transversal de um filme anódico poroso em alumínio, mostrando as regiões da barreira e porosa.

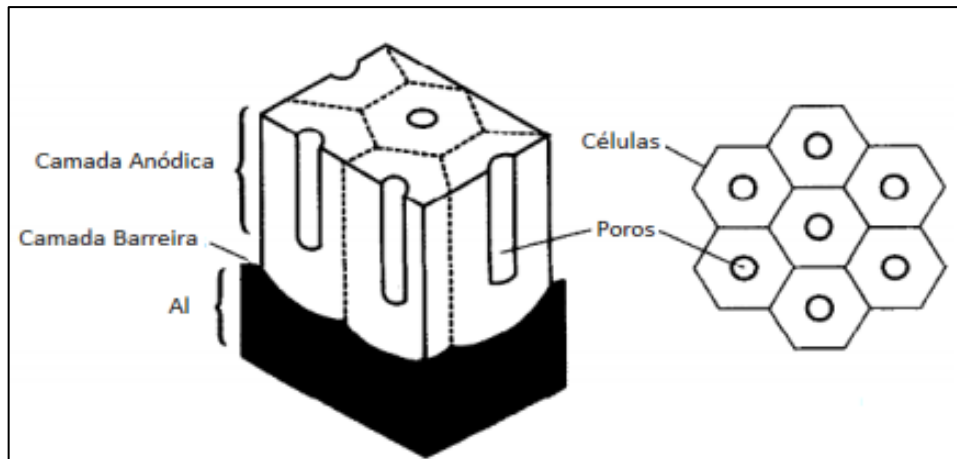


Fonte: Adaptado de Ageorges e Ye (2001).

Acima dessa camada está a principal região porosa (mais externa) que, para filmes produzidos em alumínio de alta pureza, se desenvolve como um arranjo de células em forma hexagonal e com maior permeabilidade, é mais espessa. As células hexagonais possuem um poro central perpendicular à superfície do metal (THOMPSON et al., 1999; TSANGARAKI-KAPLANOGLU et al., 2006). Além disso, os poros do filme anódico podem absorver grandes quantidades de eletrólito para a formação do filme, mas não só depende de sua natureza, como depende também da concentração de solução, temperatura, composição e da densidade de corrente aplicada no processo (PALIBRODA et al., 1995; ALVES, 2012). A Figura 6 apresenta um desenho esquemático da camada anódica do alumínio formada, para uma melhor visualização das partes do filme anódico e a região porosa discutidos anteriormente.

As proporções da espessura do filme formada em cada interface são relativamente independentes das condições de crescimento do filme, para faixas moderadas de densidade e de corrente, devido ao transporte iônico ser determinado por um processo que efetivamente interliga a migração de ânions e cátions (DOMINGUES; FERNANDES; FERREIRA, 2003; HABAZAKI et al., 1997).

Figura 6 - Formação da camada anódica da liga AA2024-T3 pelo processo de anodização.



Fonte: Alves (2012).

## 2.4 ESTRUTURAS HÍBRIDAS

O uso crescente de compósitos reforçados com fibras em diferentes campos da engenharia e a tendência emergente para componentes leves, com alto desempenho e alta funcionalidade estão levando ao uso de estruturas híbridas de múltiplos materiais (LIONETTO et al., 2018a).

Atualmente, várias indústrias, incluindo a indústria aeronáutica e automotiva, trabalham para reduzir o peso estrutural sem alterar propriedades mecânicas desejáveis. Na falta de um material com todas as propriedades, as indústrias aeronáuticas e automotivas devem combinar diferentes materiais para alcançar múltiplas propriedades em uma amostra (IZADI et al., 2017; LIONETTO et al., 2018a).

A tecnologia de fabricação de materiais leves de ponta tem tido um rápido desenvolvimento e a demanda por tecnologia de união de alto desempenho de metais e compósitos na indústria aeroespacial, no transporte ferroviário, naval e automotivo continua a aumentar (WANG; YANG; LIU, 2018).

A crescente aplicação de materiais leves e de alto desempenho, bem como tecnologias que não agredem ao meio ambiente nas indústrias aeronáutica, automotiva, e marítima levou ao uso de estruturas de materiais dissimilares, onde materiais metálicos e não metálicos são mesclados a componentes híbridos (LIONETTO; BALLE; MAFFEZZOLI, 2017).

As novas políticas econômicas e ambientais estão cada vez mais rigorosas sobre os desenvolvimentos e com fabricantes de materiais. Segundo ANDRÉ et al. (2016a), a redução do consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> estão entre as questões mais exigentes. A

solução promissora para estes problemas é usar o conceito de estruturas híbridas leves. A principal vantagem de estruturas híbridas é a sua excelente resistência específica e rigidez, associada com a combinação de propriedades individuais dos materiais (ANDRÉ et al., 2016a; LIONETTO; BALLE; MAFFEZZOLI, 2017).

A presença de múltiplos materiais pode potencialmente melhorar os comportamentos mecânico e térmico da montagem e os custos de produção, bem como as demandas de combustível de veículos automotores e aeronaves (LAMBIASE; DURANTE; ILIO, 2016). Além disso, o desenvolvimento da tecnologia dos compósitos híbridos, combinando laminados poliméricos reforçados com fibras contínuas e placas metálicas, tem como uma de suas finalidades formarem um conjunto de materiais que combine elevados valores de resistência mecânica e rigidez e baixa massa específica (ANDRÉ et al., 2016a; LIONETTO et al., 2018b).

Exemplificando, os metais exibem boas propriedades mecânicas (ductilidade, resistência, comportamento isotrópico), permitem alta flexibilidade de produção e facilidade de automação. Assim, estes são particularmente adequados para componentes complexos, que são submetidos a estados de tensões tridimensionais (LAMBIASE; DURANTE; ILIO, 2016).

Por outro lado, os compósitos reforçados com fibras contínuas são materiais leves com alta rigidez específica, dando a possibilidade de projetar o material dispondo as fibras em uma determinada direção, a fim de melhorar o comportamento mecânico do componente nessa direção (KHALED; MEHDI, 2017; LAMBIASE; DURANTE; ILIO, 2016).

A união bem sucedida entre polímeros e ligas metálicas é uma necessidade para a produção de estruturas híbridas leves de metal/polímero em várias indústrias, como as indústrias automotiva, aeronáutica e naval (IZADI et al., 2017; KARAMI PABANDI; MOVAHEDI; KOKABI, 2017).

No entanto, tecnologias envolvendo técnicas de união de materiais dissimilares com grandes propriedades físicas e químicas distintas tornaram-se um grande problema, sendo cada vez mais estudadas na literatura. O projeto de estruturas de engenharia, tão grande e complexo, composto de uma combinação de materiais distintos, tanto fisicamente como quimicamente, requer tecnologias avançadas e alternativas para a união (ANDRÉ et al., 2016a; WANG; YANG; LIU, 2018).

A união de polímeros e metais é uma tecnologia desafiadora, onde esses materiais têm propriedades químicas e físicas muito distintas. Essas diferenças causam problemas, como a baixa aderência entre o polímero e a inserção de metal (IZADI et al., 2017).

Em consequência a isso, altas demandas e pesquisas interessantes na junção de materiais dissimilares envolvendo compósitos e materiais metálicos para aplicações estruturais estão sendo realizadas. Essa união permite que os engenheiros utilizem os componentes híbridos em seções em que elevadas rigidez e resistência podem ser exploradas, com o material polimérico oferecendo uma excelente integração funcional (LIU; LIAO; NAKATA, 2014). O projeto de múltiplos materiais é possível se uma união eficiente de materiais diferentes, como metais e materiais compósitos, for realizada, superando as dificuldades relacionadas às fortes propriedades físico-químicas dissimilares dos materiais de junção (LIONETTO; BALLE; MAFFEZZOLI, 2017; LIU; LIAO; NAKATA, 2014).

Segundo Lionetto, Balle e Maffezzoli (2017), a pesquisa neste campo está agora enfrentando os desafios relacionados à baixíssima solubilidade dos metais nos polímeros e às altas temperaturas do comportamento plástico dos metais que podem levar à degradação do polímero antes da união com o metal ou da fusão no caso de técnicas de soldagem por fusão.

Além disso, em sistemas híbridos com grande dissimilaridade em propriedades mecânicas entre os materiais de união, é mais provável que a falha ocorra no componente menos resistente. Procedimentos de união ineficazes podem reduzir significativamente a eficiência obtida pelo uso dessas estruturas (ABIBE et al., 2013; LIONETTO et al., 2018a).

A reação na interface e as incompatibilidades desses materiais são as barreiras mais desafiadoras na união de materiais dissimilares. Consequentemente, diferentes métodos para unir um metal a um polímero para produzir um material híbrido industrial foram desenvolvidos para superar este problema (HADDADI; ABU-FARHA, 2015; IZADI et al., 2017).

Entretanto, a dificuldade em unir materiais diferentes e as limitações das técnicas tradicionais para unir geometrias complexas cria uma dificuldade para novas técnicas de união (ABIBE et al., 2016). Tradicionalmente, os métodos de uniões convencionais para materiais dissimilares são a colagem adesiva e fixadores mecânicos, bem como juntas híbridas rebitadas/coladas (HUANG et al., 2018a; LIONETTO; BALLE; MAFFEZZOLI, 2017; LIU; LIAO; NAKATA, 2014; WANG; YANG; LIU, 2018).

O uso de adesivos promove um contato contínuo entre a superfície das peças, o que resulta em estruturas com distribuição uniforme de tensão e bom desempenho mecânico sob tensão, compressão e cisalhamento (ABIBE et al., 2016). Entretanto, a colagem adesiva é um método caro que requer uma preparação cuidadosa da superfície antes da união e um longo tempo de cura (FARAHANI; DUBÉ, 2017; HUANG; SUGIYAMA; YANAGIMOTO, 2013).

As propriedades necessárias de aderência são atingidas apenas se o processo de reticulação for realizado adequadamente em termos de tempo e temperatura. Além disso, a evaporação do solvente, que geralmente é encontrada em sistemas adesivos termoendurecíveis, pode resultar em riscos à saúde e à segurança (ABIBE et al., 2016; LIONETTO et al., 2018a; LIONETTO; MOSCATELLO; MAFFEZZOLI, 2017).

Outras desvantagens desta tecnologia são a baixa durabilidade das juntas adesivas e as emissões ambientais prejudiciais. Em particular, a seleção de adesivos apropriados é crítica para unir materiais dissimilares porque a degradação do adesivo com o tempo pode reduzir significativamente a força de adesão (ARENAS et al., 2013; LAMBIASE; DURANTE; DI ILIO, 2016; PRAMANIK et al., 2017).

A fixação mecânica é largamente utilizada devido à sua simplicidade e facilidade de desmontagem. Entretanto, segundo Graham et al. (2014) e Liu, Liao e Nakata (2014), as principais desvantagens dos fixadores mecânicos derivam de operações de perfuração, que interrompem a continuidade da fibra e levam a uma redução da capacidade de carga do material devido a concentrações de tensão e delaminações. Os processos convencionais de união mecânica por meio de parafusos ou rebites geralmente apresentam várias desvantagens associadas ao longo tempo de união exigido pelas operações de furação e fixação e ao corte das fibras reforçadas (LIONETTO et al., 2017; PARKES et al., 2014). Além disso, os fixadores são expostos à corrosão e aumentam o peso das estruturas devido à sua massa adicional (KABCHE et al., 2007; TAN et al., 2015; UCSNIK et al., 2010).

Devido às limitações e as desvantagens dos métodos tradicionais para a junção de materiais dissimilares, alguns estudiosos propuseram novas tecnologias baseadas em soldagem para unir metal e compósitos de forma eficiente (HUANG et al., 2018a).

Um número de técnicas de soldagem para a junção entre metal/polímero estão sendo estudadas. Soldagens por resistência elétrica, ultrassônica, laser, fricção e por indução surgiram com diferentes vantagens e desvantagens relacionadas entre si. Geralmente, essas técnicas de união têm processos robustos e fornecem juntas de boa qualidade (ANDRÉ et al., 2016a; LIONETTO et al., 2018a).

## 2.5 SOLDAGEM ENTRE MATERIAIS DISSIMILARES

As técnicas de soldagem em materiais dissimilares (por exemplo entre compósito polimérico e alumínio) são baseadas na capacidade das matrizes termoplásticas de compósitos

fundir e, subsequentemente, resfriar sem qualquer alteração em suas propriedades. Como resultado da fusão e reconsolidação, forças de adesão na interface entre metal e polímero são geradas (LIONETTO; BALLE; MAFFEZZOLI, 2017).

A soldagem em materiais compósitos leva a grandes vantagens adicionais significativas aos métodos tradicionais de união, dadas pelo tempo de montagem reduzido, sem o aumento de peso. A soldagem é capaz de superar as limitações relacionadas ao adesivo e evitando o aumento de peso de uma estrutura montada por fixação mecânica (LIONETTO et al., 2017).

Embora na literatura o aquecimento na região de união seja considerado o mecanismo dominante, também foi reconhecido que a estrutura do compósito determina a natureza do mecanismo de aquecimento (AHMED, 2006; GROUND, 2002).

Para alcançar uma boa adesão entre dois reforços, os laminados têm de ser aquecidos acima da temperatura de transição vítrea, para matrizes amorfa e da temperatura de fusão, para matrizes semicristalinas. A temperatura máxima também deve ser menor que a temperatura de degradação da matriz. Então, a pressão deve ser aplicada no laminado quando a matriz ainda estiver amolecida, a fim de alcançar o contato íntimo e evitar a desconsolidação (LIONETTO et al., 2017).

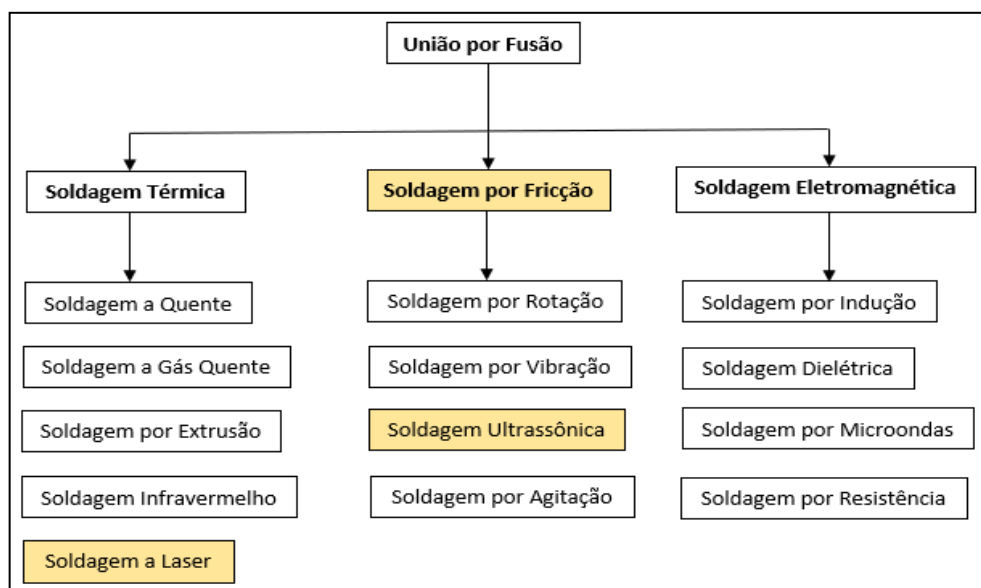
A Figura 7 apresenta os processos de soldagem que atuam na união que envolvem os compósitos termoplásticos. Além disso, os principais processos que envolvem a soldagem entre metal/polímero estão destacados na imagem que, segundo os relatos de Liu, Liao e Nakata (2014) e Huang et al. (2018a), devido à alta dificuldade na união de um metal e polímero, os processos de soldagem por fricção e ultrassom estão sendo estudados e aplicados demasiadamente e o laser começando a ser aplicado, em consequência a obtenção de juntas metal/polímero de alta qualidade entre esses materiais.

Atualmente, a soldagem por fricção é o método mais estudado e encontrado na literatura para a união de estruturas metal/polímero (ANDRÉ et al., 2016b, 2016a; GOUSHEGIR; DOS SANTOS; AMANCIO-FILHO, 2014; HUANG et al., 2018a; KARAMI PABANDI; MOVAHEDI; KOKABI, 2017; LIU; LIAO; NAKATA, 2014). O conceito associado a soldagem por fricção é uma geração de calor em uma interface conjunta do trabalho de fricção sob a aplicação de pressão, seguida de resfriamento e consolidação do polímero (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

Dentre os estudos encontrados na literatura, o processo de soldagem por fricção possui algumas variações, mas partindo essencialmente do mesmo conceito. O que mais se destaca para a junção entre metal/polímero é a união pontual por fricção – FSpJ (*Friction Spot Joining*)

(ANDRÉ et al., 2016b; HUANG et al., 2018b; KARAMI PABANDI; MOVAHEDI; KOKABI, 2017) e a soldagem ultrassônica (BALLE; WAGNER; EIFLER, 2009; LIONETTO et al., 2018a; LIONETTO; BALLE; MAFFEZZOLI, 2017; ZHANG; ROBSON; PRANGNELL, 2016).

Figura 7 - Soldagem em materiais compósitos termoplásticos.



Fonte: Adaptado de Yousefpour, Hojjati e Immarigeon (2004).

Segundo André et al. (2016b), o processo FSpJ utiliza uma ferramenta não-consumível composta por três partes concêntricas: um anel de fixação, um rolamento e um pino, que rotacionam e se movem axialmente e de forma independente. Durante o processo FSpJ, o atrito entre a ferramenta de soldagem e os compósitos termoplásticos gera calor friccional. O calor friccional é benéfico para amolecer ou fundir compósitos termoplásticos e, em seguida, melhorar a interdifusão macromolecular. Ao mesmo tempo, o fluxo de material induzido pela deformação plástica aumenta o intertravamento mecânico (GONÇALVES et al., 2015; HUANG et al., 2018b; KARAMI PABANDI; MOVAHEDI; KOKABI, 2017).

A soldagem ultrassônica é um processo que utiliza uma alta frequência por vibração mecânica ultrassônica para soldar as peças. As peças a serem soldadas são mantidas juntas sob pressão e então submetidas a uma oscilação perpendicular ou paralela de alta frequência (tipicamente entre 20 e 40 kHz) e é usada para produzir pequenos deslocamentos de amplitude para gerar aquecimento interfacial, dependendo da geometria da junta, para transmitir vibrações através do material. Calor é gerado por uma combinação de atrito

superficial e intermolecular no material (WANG et al., 2017; YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

Entretanto, esses processos de união por fricção são limitados a materiais de baixo ponto de fusão e não é aplicado a materiais com grandes espessuras. A baixa condutividade térmica dos polímeros, juntamente com a sua estrutura molecular complexa, requer mudanças nas ferramentas de soldagem e no projeto de ferramentas, necessitando mais estudos para entender como o método de soldagem pode ser controlado, além da dificuldade de automatização da soldagem ultrassônica e sua limitação quanto a sua dimensão (ANDRÉ et al., 2016a; KAH et al., 2014; OKADA; UCHIDA; NAKATA, 2018).

Uma maneira de melhorar ainda mais o desempenho da união entre materiais dissimilares é gerar intertravamentos na superfície do metal, de modo a produzir irregularidades superficiais que forneçam um intertravamento mecânico com o polímero fundido. Portanto, um maior controle das irregularidades da superfície em uma escala micrométrica torna-se importante para as junções entre metal/polímero (ERDMANN; HOLZLEITNER, 2007; RODRÍGUEZ-VIDAL et al., 2018).

### **2.5.1. Soldagem a laser**

O laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é o resultado da emissão de fótons de um átomo que, quando excitado, libera energia em forma de luz ao voltar para seu estado fundamental (SAYAMA, 2016).

Um feixe de laser também é conhecido como uma luz coerente de radiação eletromagnética, de um único comprimento de onda (monocromático). É referido como uma fonte de calor de alta densidade de potência com um atributo de divergência do feixe muito baixo (OLADIMEJI; TABAN, 2016; ZHAO; WHITE; DEBROY, 1999).

Os lasers podem ser projetados para operar com uma quantidade de energia alta para uma área concentrada muito pequena, onde apresentam densidades de potência elevada (DUBEY; YADAVA, 2008; JUNIOR, 2015). A técnica de processamento a laser tornou-se uma tecnologia indispensável neste século XXI devido a seus atributos únicos, como alta densidade de potência e alta velocidade de operação, potenciais superlativos e contribuição para a manufatura contemporânea das indústrias (OLADIMEJI; TABAN, 2016).

A soldagem a laser tem recebido grande atenção como uma tecnologia de união com alta qualidade, alta precisão, alto desempenho, alta velocidade, boa flexibilidade e baixa deformação ou distorção (KATAYAMA; KAWAHITO; MIZUTANI, 2010).

A maioria das aplicações de solda a laser está limitada a metais. Entretanto, os feixes de laser também podem ser usados para soldar polímeros termoplásticos e até peças de compósitos termoplásticos (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004). Dependendo das propriedades ópticas do polímero no comprimento de onda do feixe de laser, existem duas variantes. Na união por laser, o polímero é transparente a radiação do laser e o feixe de laser atinge a interface através do polímero sem ser absorvido (RODRÍGUEZ-VIDAL et al., 2018; YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

Em contraste, na união por condução, o polímero é opaco ao comprimento de onda do laser, então a superfície de metal oposta à interface é diretamente irradiada pelo feixe de laser, e o calor é transportado por condução até a interface, aquecendo assim o polímero (RODRÍGUEZ-VIDAL et al., 2018).

No entanto, a soldagem por laser de materiais dissimilares ainda está em fase de estudo e desenvolvimento para uso industrial e uma pesquisa mais profunda deve ser realizada. O desempenho mecânico dos conjuntos produzidos deve ser melhorado enquanto o tempo de ciclo é reduzido (RODRÍGUEZ-VIDAL et al., 2018).

Segundo Sánchez-Amaya e Boukha (2012), a soldagem a laser é difícil de ser implementada em juntas que envolvem as ligas de alumínio devido à alta condutividade térmica (provocando uma rápida transferência de calor na peça de solda que limita a concentração de energia na solda) e baixa viscosidade (restringindo o crescimento da poça de fusão antes da solidificação). Conforme relatado por Sánchez-Amaya et al. (2017), essa característica da poça formada ocorre à medida em que o feixe de laser atinge a superfície do metal e, conseqüentemente, absorve a energia do feixe, criando assim uma poça de fusão. A densidade de energia do feixe de laser localmente aquece o material até uma temperatura acima do seu ponto de fusão e abaixo do seu ponto de ebulição e a solda então é formada a partir do derretimento das partes conjugadas.

A tecnologia do laser é eficiente para unir, cortar e perfurar materiais de engenharia, assim como para a realização de tratamentos de superfície como, por exemplo, revestimentos. O processo de soldagem por laser emprega um feixe de luz concentrado, de alta densidade de energia ou energia localizada, obtendo juntas soldadas com fusão localizada na junção de componentes metálicos e não metálicos (OLADIMEJI; TABAN, 2016; SAYAMA, 2016).

Materiais como o alumínio, magnésio, titânio, aços carbono, aço inoxidável, aços de baixa liga de alta resistência, polímeros, carbono e compósitos reforçados com fibras contínuas podem ser soldados pelo processo a laser, com juntas soldadas com diferentes espessuras podendo ser obtidas (OLADIMEJI; TABAN, 2016).

Uma fusão com um aquecimento localizado ou com menores dimensões são obtidos quase instantaneamente durante a soldagem a laser, e este atributo único da soldagem facilita a alta produtividade ou velocidade do processo (CUI et al., 2013; TAWFIQ et al., 2012).

Os sistemas a laser são geralmente automatizados e acoplados a excelentes sistemas de posicionamento de precisão; esta exploração faz com que a manipulação e a repetibilidade do processo de soldagem sejam facilmente alcançadas. O sistema oferece uma grande flexibilidade pois um raio laser pode ser facilmente regulável modelado, refletido, alinhado, redirecionado, dividido e focalizado por elementos ópticos ou mecânicos (CUI et al., 2013; KATAYAMA; KAWAHITO; MIZUTANI, 2012; MÖLLER; THOMY, 2013).

Além disso, oferece alta taxa de proporção de solda (grande relação entre profundidade / largura), facilidade de automação, alta produtividade, flexibilidade de fabricação, com pouca distorção e pequenas zonas afetadas pelo calor (KESSLER, 2013; OLADIMEJI; TABAN, 2016; SCHWEIER et al., 2013).

Os equipamentos de soldagem disponíveis usam meios ativos que geralmente estão na forma de um sólido ou gás. Como resultado, estes são referidos como lasers de estado sólido e lasers a gás. Os lasers de estado sólido são caracterizados por classes, podendo ser um cristal de neodímio (Nd), laser de rubi, dopado com ítrio (Y) e granada de alumínio de ítrio de neodímio (Nd: YAG). Os lasers de gás são, normalmente, uma mistura de CO<sub>2</sub>, hélio e nitrogênio (OLADIMEJI; TABAN, 2016; SAYAMA, 2016). As características e benefícios da utilização da soldagem a laser é resumida pela Tabela 2.

O mecanismo de soldagem a laser é referido de modo em que a solda ou união é obtida quando um feixe de laser é colidido/interagido na superfície do material, com a possibilidade de se alterar a densidade de energia, variando-se a potência e o foco do feixe, sendo os constituintes atômicos do material no ponto de foco do feixe sofrerem movimentos aleatórios rápidos de excitação. Segundo Sayama (2016), esses dois fatores contribuem diretamente para a penetração e largura do cordão de solda e a formação e tamanho da zona termicamente afetada do material soldado (HUBER; GLASSCHROEDER; ZAEH, 2011; OLADIMEJI; TABAN, 2016; SAYAMA, 2016).

Como relatado por Junior (2015), quando a superfície da amostra atinge seu ponto de fusão, parte do líquido escorre para dentro da amostra, para valores altos de intensidade do laser. Como resultado, o aumento de temperatura é rapidamente iniciado, a fusão na posição focalizada ocorre rapidamente e a vaporização intensa se origina em uma velocidade muito elevada e em poucos segundos (HUBER; GLASSCHROEDER; ZAEH, 2011; OLADIMEJI; TABAN, 2016).

Tabela 2 - Benefícios da tecnologia de soldagem a laser.

| <b>Propriedades do Laser</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Benefícios relacionados a soldagem</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Economia do laser</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Feixe colimado e coerente;</li> <li>• Alta densidade de potência;</li> <li>• Foco preciso;</li> <li>• Alta Precisão;</li> <li>• Baixa entrada de calor;</li> <li>• Alta velocidade de soldagem;</li> <li>• Processo de soldagem sem contato;</li> <li>• Limpador de soldagem por arco ou gás;</li> <li>• Possibilidade de grandes distâncias de trabalho;</li> <li>• Não influenciado pelo magnetismo.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor distância focal/diâmetro focalizado;</li> <li>• Baixa Distorção estrutural;</li> <li>• Baixa tensão térmica e mecânica;</li> <li>• Estrutura de grãos finos;</li> <li>• Soldagem em variadas configurações;</li> <li>• Possibilidade de soldagem de peças espessas;</li> <li>• Acessibilidade para estruturas complexas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta produtividade;</li> <li>• Versatilidade de Material;</li> <li>• Automação/Robotização;</li> <li>• Boa flexibilidade;</li> <li>• Mão de obra reduzida;</li> <li>• Excelente repetibilidade;</li> <li>• Baixo tempo de operação pós-soldagem;</li> <li>• Sistematização de linhas de produção;</li> <li>• Nenhum desgaste de ferramenta/mudança ao longo do tempo;</li> <li>• Soldagem em uma única passagem.</li> </ul> |

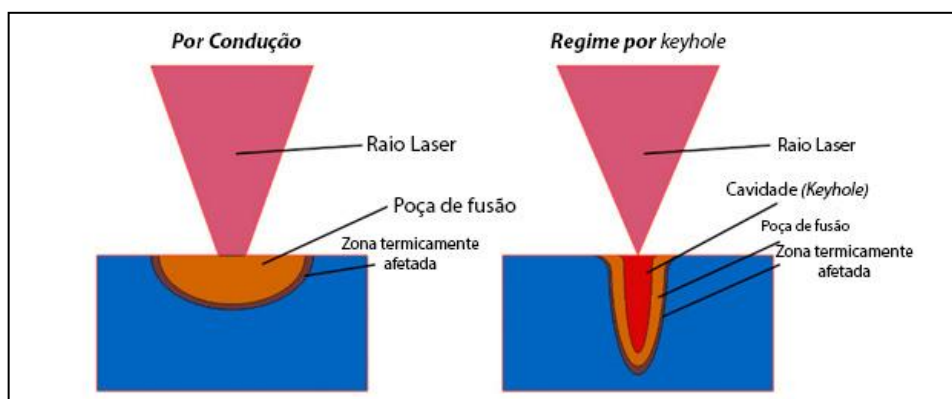
Fonte: Oladimeji e Taban (2016).

Segundo Coelho (2012), a distância focal, medida entre a lente de focalização e a superfície da peça, deve ser grande o suficiente para garantir que respingos do processo de soldagem não danifiquem o equipamento. Quanto maior essa distância, maior também a profundidade do foco. Existem dois princípios de funcionamento do processo de laser: pela condução térmica e pelo regime *keyhole*. Esses dois mecanismos estão representados pela Figura 8 (SÁNCHEZ-AMAYA et al., 2017).

A principal diferença entre esses dois regimes operacionais é a densidade de potência aplicada à área de soldagem. A condução térmica ocorre quando a intensidade de energia não é

suficiente para provocar a evaporação suficiente do metal, enquanto no *keyhole*, a intensidade é suficientemente alta para causar vaporização na zona de fusão, criando uma cavidade (orifício na coluna) no material. Esta cavidade é estabilizada pela pressão do próprio vapor gerado (SÁNCHEZ-AMAYA et al., 2017).

Figura 8 - Descrição esquemática dos regimes por condução e *keyhole*.



Fonte: Adaptado de Sánchez-Amaya et al. (2017).

#### 2.5.1.1 Keyhole

O regime *keyhole* envolve um mecanismo que utiliza uma alta potência na soldagem, conduzindo a formação de cordões de solda mais estreitos e com alta profundidade, como apresentado na Figura 8 (SÁNCHEZ-AMAYA et al., 2017; JUNIOR, 2015).

Este processo é alcançado quando a temperatura da superfície do metal fundido excede a sua temperatura de vaporização. Como descrito por Junior (2015), a vaporização ocorre antes mesmo da formação da poça de fusão penetrar para o interior da amostra, onde o material é removido em forma de vapor ou por “expulsão de líquido” e o resultado disso é a formação de uma cavidade (vazio) nessa região onde foi aplicado o feixe.

O vapor metálico estabelecido exerce uma pressão sobre a superfície do líquido, ocorrendo a deformação da superfície, volatilizando o metal de base, formando um plasma ao redor do feixe de laser que é circundado pela poça de fusão. Como resultado, a penetração da solda é formada de tal forma que a profundidade de penetração da solda é muitas vezes maior que a largura do cordão de solda (AHN et al., 2017a; SÁNCHEZ-AMAYA et al., 2017; SOKOLOV; SALMINEN, 2014).

Durante esse processo, o gás plasma é gerado, oriundo do processo de vaporização de elementos de liga do metal de base após serem aquecidos com grandes quantidades de energia.

O gás plasma induzido provoca um efeito de proteção e instabilidade no *keyhole*; como resultado, a penetração profunda da solda é inibida e os defeitos de porosidade são reforçados (CAI et al., 2014; OLADIMEJI; TABAN, 2016).

Essa interação do plasma gerado influencia o comportamento de soldagem ao afetar a absorção, a refração e a dispersão do feixe de laser. O plasma formado geralmente tem um campo de alta temperatura que também afeta a reação entre o metal fundido e o gás atmosférico (TSUKAMOTO, 2011).

O plasma induzido por laser é também referido como ponto de alta temperatura gerado pelo laser, pois possui uma temperatura mais alta e uma maior densidade de elétrons do que as regiões adjacentes. Como resultado, esta região apresenta menor resistência (CHEN et al., 2008; OLADIMEJI; TABAN, 2016).

Ainda, segundo Sayama (2016), para remover o plasma, utiliza-se gás de proteção, que pode ser argônio ou hélio, e consequentemente proporcionando diferenças na interação feixe-matéria, alterando a transferência da energia, influenciando na penetração, geometria e qualidade do cordão de solda.

Em ligas de alumínio, durante a penetração do regime *keyhole*, a tensão superficial e a pressão hidrostática atuam no fluido na liga fundida. Essas forças tendem a fechar a cavidade do *keyhole*, sendo que a pressão do próprio vapor gerado no interior da cavidade tende a abrir essa cavidade. Esta tendência anômala no interior do *keyhole* durante a soldagem a laser geralmente cria porosidade devido ao aprisionamento de gás (CAI et al., 2014; OLADIMEJI; TABAN, 2016; SÁNCHEZ-AMAYA et al., 2017).

A produção de *keyhole* têm a propensão de criar alguns problemas ou preocupações durante a soldagem a laser. Os problemas conhecidos são a instabilidade, oscilação e colapso do processo ou o fechamento intermitente da cavidade do *keyhole* (JIANG et al., 2016; OLADIMEJI; TABAN, 2016).

#### 2.5.1.2 Condução Térmica

O regime de soldagem a laser por condução térmica ocorre em densidades de potência menores ou em velocidades de soldagem mais altas. A energia laser absorvida é transferida para o volume do metal base por condução de calor. No final, uma poça de fusão ampla e superficial é produzida (OLADIMEJI; TABAN, 2016).

A temperatura da superfície do material a ser atingida não excede a temperatura de vaporização. Neste caso, pode-se afirmar que a profundidade de penetração é menor que a largura do cordão de solda. A produção de metal líquido durante a soldagem a laser exerce fortes efeitos sobre a poça de fusão e, eventualmente, afeta a forma da poça de fusão (KARKHIN; PLOCHIKINE; BERGMANN, 2001; OLADIMEJI; TABAN, 2016).

Em comparação com o regime *keyhole*, o regime de soldagem por condução térmica tem sido considerado um processo mais estável porque a vaporização do metal ocorre em um nível mais baixo (OLADIMEJI; TABAN, 2016). O regime de soldagem por condução a laser tem sido descrito como a abordagem alternativa de soldagem de materiais difíceis de soldar como ligas de alumínio, magnésio e titânio e soldagem de materiais dissimilares (SÁNCHEZ-AMAYA et al., 2017; SOKOLOV; SALMINEN, 2014).

Segundo JIAO et al. (2017), a técnica por soldagem a laser, a partir do método de união por condução térmica, possui algumas vantagens se relacionado a outros processos de união entre metal/polímero por soldagem ou outros métodos de soldagem a laser, tais como baixo efeito térmico, alta eficiência e o não contato direto da matriz polimérica na exposição ao laser.

Como relatado por Zhao, White e Debroy (1999), a absorção da energia emanada do laser depende muito da absorção condutiva dessa energia pelos elétrons livres do metal base, como também a natureza da superfície do metal influencia a absorvidade. Como resultado, a eficiência da transferência de energia durante o regime de condução é julgada como sendo equivalente à absorvidade da peça de trabalho de metal ou alumínio.

Rasch et al. (2019) mencionam que a condução de calor é conhecida por ser o regime de processo mais estável na soldagem a laser, entretanto, poucas pesquisas foram realizadas nesse regime de processo (e na maioria dos casos, a condução por calor do laser não é nem mencionada explicitamente).

Sánchez-Amaya et al. (2012) são um dos poucos que investigaram as ligas AA2024-T3 frente ao processo a laser por condução térmica. Estes autores usaram um laser de diodo com uma potência máxima de 2,75 kW e um tamanho do feixe de  $2,2 \times 1,7 \text{ mm}^2$  para criar cordões de solda em seis ligas de alumínio de alta resistência. A partir deste estudo, os autores observaram que uma potência mínima de 2 kW e velocidade máxima de 16 mm/s é necessária para criar um poço estável de fusão e livre da propagação de trincas a quente.

Conforme relatado por Sánchez-amaya e Boukha (2012), embora o regime por condução térmica geralmente gere soldas de penetração limitada, sua estabilidade melhora a qualidade da solda, oferecendo um modo de união alternativo para materiais difíceis de soldar, como as ligas

de alumínio. Este mecanismo de aquecimento único facilita uma reação da região interfacial alumínio/compósito a temperaturas muito altas, aliado a alta condutibilidade e resistividade do alumínio (PRAMANIK et al., 2017).

#### 2.5.1.3 Soldagem Laser de Fibra

Os lasers de fibra pertencem ao grupo do laser de estado sólido. Devido às suas características, como alta potência com baixa divergência de feixe, tamanho compacto, pois a fibra pode ser encurvada ou enrolada para economizar espaço, tem boa qualidade do feixe, baixa manutenção e sem problemas de alinhamento (AHN et al., 2018).

O laser de fibra tem recebido um interesse crescente pela soldagem com base nas vantagens que oferece sobre os lasers existentes, como melhor eficiência de laser, maior potência de saída, qualidade de feixe superior, maiores distâncias de trabalho, e menor necessidade de manutenção (AHN et al., 2018; JIAO et al., 2017).

A solda a laser a fibra pode substituir muitas das tecnologias tradicionais de soldagem com muitos benefícios que podem ser somados por custos reduzidos, maior eficiência e soldas de maior qualidade. De fato, a produtividade e a alta velocidade de soldagem dos lasers de fibra de alta potência são incompatíveis com a maioria das outras fontes de laser tradicionais ou de feixe único (JIAO et al., 2017; KATAYAMA; KAWAHITO; MIZUTANI, 2010; KESSLER, 2013).

Os lasers de fibra são ideais para uso em soldagem e penetração de alta velocidade em aços e também para soldagem de materiais mais refletivos, incluindo o alumínio e o cobre. Os lasers de fibra possuem propriedades únicas de alto brilho, qualidade de feixe selecionável, foco fino, flexibilidade de aplicação e baixo custo de propriedade (AHN et al., 2018; OLADIMEJI; TABAN, 2016; TAWFIQ et al., 2012).

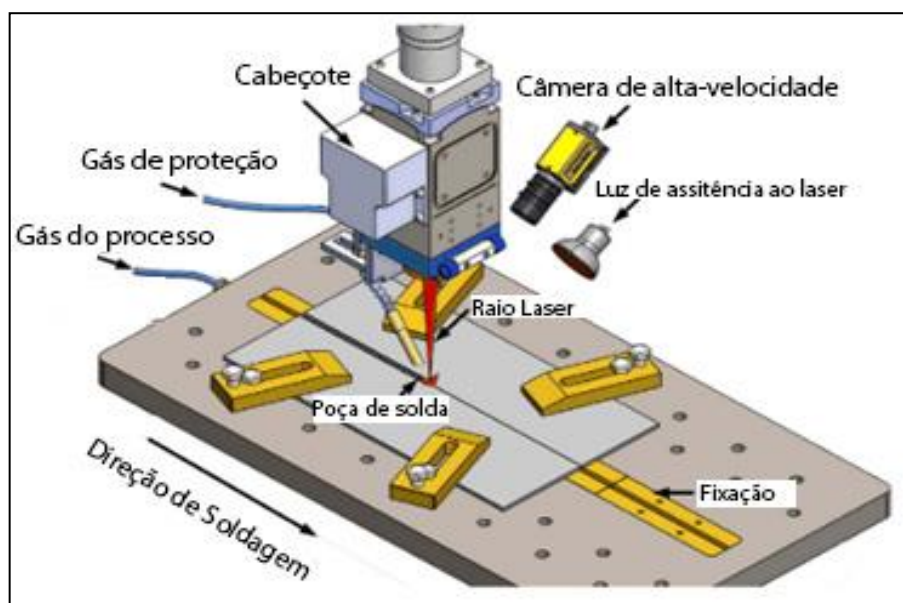
O laser de fibra também oferece várias aplicações para soldagem por condução, que ocorre em densidades de potência muito menores. Além disso, com controle fino sobre as larguras de pulso e soldagem por frequência de pulso de materiais finos e componentes muito pequenos também são possíveis (JIAO et al., 2017; KESSLER, 2013).

Atualmente, os lasers de fibra têm o menor custo de propriedade no mercado, uma vez que estes apresentam baixos custos de operação, baixo consumo de energia elétrica e vida útil muito longa. Os custos de manutenção são baixos e não há consumíveis internos no laser (JIAO et al., 2017; OLADIMEJI; TABAN, 2016). A Figura 9 ilustra um equipamento típico de laser

de fibras. Atualmente, os lasers mais comuns, utilizam um laser do tipo sólido Yb: fibra, que é constituído por uma fibra óptica dopada com itérbio, que será utilizado nesse trabalho.

Sua utilização é possível em uma grande variedade de aplicações de soldagem, juntamente com sua alta velocidade e flexibilidade de aplicação, tornando os lasers de fibra óptica uma excelente escolha para as indústrias automotiva, médica, eletrônica e aeroespacial (OLADIMEJI; TABAN, 2016).

Figura 9 - Componente padrão de soldagem a laser por fibras.



Fonte: Adaptado de Jiang et al. (2016).

O laser de itérbio tem um comprimento de onda de  $1,07 \mu m$  semelhante ao do laser Nd: YAG, por isso tem as mesmas vantagens dos lasers de menor comprimento de onda, como entrega de feixe de fibra óptica, melhor soldabilidade e menor limite de densidade de potência soldagem comparado com o laser de  $CO_2$  (AHN et al., 2018).

Em um laser de fibra, a luz do laser é gerada em uma fibra de saída e guiada para a peça de trabalho por meio de uma fibra secundária, que atua como um “guia de luz”. A fibra de saída tem  $50 \mu m$  de diâmetro e 5 m de extensão, e é conectada a uma unidade de acoplamento, fazendo a conexão com uma segunda fibra com  $100 \mu m$  de diâmetro e 10 m de comprimento. A fibra secundária é conectada a um colimador óptico formando o sistema de acoplamento do feixe (COELHO; LIMA; DA COSTA, 2013; JIAO et al., 2017). A flexibilidade da entrega deste feixe de laser é uma característica importante para muitas formas de processamento de

material, como corte a laser, soldagem a laser, marcação a laser e gravação a laser (JIAO et al., 2017).

Na literatura, há alguns estudos relacionados envolvendo a junção que envolve materiais termoplásticos, compósitos e metais. No trabalho realizado por Jiao et al. (2017), os autores utilizam a soldagem a laser por fibra para a junção entre os polímeros térmicos reforçados com fibra de carbono (*Carbon fiber reinforced polymers – CFRP*), com camadas de PPS/fibra de carbono, e aço inoxidável, utilizando-se do princípio da condução térmica, onde o laser é aplicado diretamente ao aço inoxidável, com o objetivo de se determinar a resistência da junta soldada e uma análise aprofundada da microestrutura, a partir de um modelo matemático nas relações entre os comportamentos térmicos e os parâmetros de junção. Uma resistência de 17,5 MPa foi obtida na junção do CFRP e aço inoxidável. O resultado numérico do estudo mostrou que a profundidade e a largura da junta aumentam com o aumento da potência do laser e diminuem com o aumento da velocidade de soldagem e do diâmetro do feixe de laser, influenciando na interação dos materiais envolvidos, onde o PPS fluiu para a interface CFRTTP e do aço inoxidável, formando uma ligação mecânica.

No trabalho realizado por Rodríguez-Vidal et al. (2018), utiliza-se também o método por condução térmica, no princípio em que o polímero é opaco ao comprimento de onda do laser, de modo que a superfície metálica oposta à interface é diretamente irradiada pelo raio laser, e o calor é transportado por condução para a interface, aquecendo o polímero. Nesse estudo, foi utilizado um aço de baixa liga 420 e um poliamida reforçado com fibra de vidro (PA6-GF30). A peça de aço foi estruturada para realizar um intertravamento mecânico adequado ao unir-se ao polímero, onde o lado oposto do metal foi irradiado por um sistema de laser de fibra de onda contínua (*continuous wave - cw*) até atingir a temperatura de fusão do polímero na interface de ambos os materiais. O resultado do estudo mostrou que ao utilizar-se da mesma fonte de laser, atinge-se uma força de rompimento em cerca de 4200 N, quando uma área de união de 10x20 mm é considerada e, além disso, quanto maior a densidade da estrutura, maiores os valores de resistência da junta.

Amend, Pfindel e Schmidt (2013) analisaram a união entre alumínio-magnésio com três termoplásticos diferentes. O estudo considerou a micro estruturação da superfície do alumínio realizada por pulsos de laser em nanosegundos, analisando a influência de duas texturas de superfície diferentes (grade e crateras) na resistência por tração. Como resultado, foram obtidos valores de resistência entre 13,4 a 19,7 MPa na junção entre o metal/polímero de seu estudo.

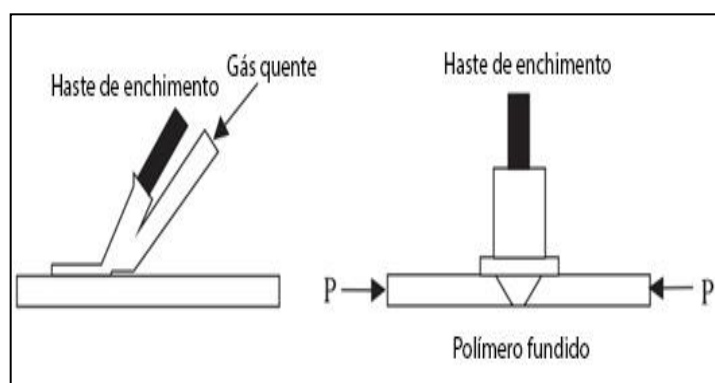
### 2.5.2 Soldagem por gás quente

O conceito utilizado neste trabalho a respeito da soldagem por gás quente, deriva do conceito do processo que é utilizado para soldagem de materiais termoplásticos. A soldagem a gás quente de compósitos termoplásticos e/ou plásticos é um pouco semelhante a soldagem a gás de metais, exceto que a chama aplicada é substituída por uma corrente de gás quente (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

Segundo AHAMAD et al. (2016), a soldagem a gás quente é uma das tecnologias de soldagem mais fáceis e econômicas para unir termoplásticos. Nesta técnica, as superfícies de ligação são fundidas com a corrente de ar quente/gás e, em seguida, a haste de enchimento é forçada para um sulco entre as duas peças a serem soldadas e, assim, é aquecido o termoplástico até que ele amoleça o suficiente para fundir as superfícies sob pressão. A Figura 10 ilustra este processo (MAHMOOD; KHAN, 2013; YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

A técnica de soldagem de polímeros por gás quente pode ser adotada no cenário atual de amplas aplicações estruturais. A partir deste método de união, o custo de substituição de componentes poliméricos pode ser economizado. Este método ainda se encontra em fase de desenvolvimento e é necessário mais trabalho para superar os desafios da união de plásticos (AHAMAD et al., 2016).

Figura 10 - Componente padrão da soldagem gás quente em materiais termoplásticos.



Fonte: Adaptado de Yousefpour, Hojjati e Immarigeon (2004).

Durante o processo de soldagem, o gás aquecido, geralmente ar, é usado para fundir ou suavizar localmente o material em questão, devido a aplicação da chama tanto no consumível utilizado no processo (enchimento) quanto às peças a serem soldadas (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004; TROUGHTON, 2008).

Antes da soldagem, a superfície das amostras deve ser limpa para garantir que qualquer contaminação, na forma de sujeira, poeira ou graxa, seja removida. As peças limpas e o consumível do processo devem ser lixados para remover qualquer camada de óxido e para garantir que a união fique livre de contaminação proveniente dessa soldagem (TROUGHTON, 2008).

A soldagem por gás quente é uma técnica flexível, que requer um equipamento simples e portátil, e pode ser usado para fabricar peças grandes e complexas (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004). A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros do processo de soldagem por gás quente comumente utilizado para a união de compósitos termoplásticos (HAQUE; SIDDIQUI, 2016).

Tabela 3 – Principais parâmetros do processo por gás quente.

| <b>Parâmetros do Processo</b>       | <b>Descrição</b>                                                                       |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| • <b>Temperatura</b>                | Temperatura do gás quente;                                                             |
| • <b>Gás</b>                        | Composição do gás quente (ar, dióxido de carbono, hidrogênio, oxigênio ou nitrogênio); |
| • <b>Ângulo</b>                     | O ângulo entre a solda e a haste                                                       |
| • <b>Velocidade de Deslocamento</b> | Taxa a qual a soldagem será depositada;                                                |
| • <b>Força de Soldagem</b>          | Quantidade de força aplicada a haste;                                                  |
| • <b>Haste de Enchimento</b>        | Composição da haste de enchimento;                                                     |
| • <b>Distância de Soldagem</b>      | Distância entre a tocha e a peça a ser soldada;                                        |
| • <b>Pressão do gás/ar quente</b>   | Pressão do gás que vem da tocha.                                                       |

Fonte: Haque e Siddiqui (2016).

O gás quente é aplicado principalmente em peças termoplásticas e têm o potencial de soldar materiais compósitos termoplásticos preenchidos com partículas ou termoplásticos reforçados com fibras contínuas. No entanto, essas técnicas são processos difíceis de controlar e inadequados para altas taxas de produção (TROUGHTON, 2008). Além disso, a grande desvantagem desse processo é que a qualidade da soldagem depende da habilidade do operador e, além disso, a degradação térmica e a oxidação podem ocorrer devido a temperatura do gás quente ser muito mais alta que a temperatura de degradação do polímero (MAHMOOD; KHAN, 2013; O. BALKAN; H. DEMIRER; H.YILDIRIM, 2008). A Tabela 4 apresenta os principais valores de tensão de ruptura obtidos a partir da literatura para a soldagem por gás quente em materiais termoplásticos soldados.

A soldagem por oxi-combustão, utilizando uma chama de GLP (gás liquefeito de petróleo), foi planejado seguindo o conceito da soldagem por gás quente em termoplásticos, onde seu aquecimento (na temperatura de transição vítrea em termoplásticos amorfos e temperatura de fusão em termoplásticos semicristalinos), a partir de um gás aquecido auxiliado por um consumível do mesmo material, possibilita a sua união (YOUSEFPOUR; HOJJATI; IMMARIGEON, 2004).

Tabela 4 - Resistência a tração de termoplásticos soldados pelo processo de gás a quente.

| <b>Material de base</b>     | <b>Resistência a tração (MPa)</b> |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Polietileno (PE)            | 10,13 – 13,22                     |
| Polipropileno (PP)          | 13,33 – 19,00                     |
| Policloreto de Vinila (PVC) | 14,82 – 25,22                     |

Fonte: Marczis e Czirány (2006); Balkan, Demirel e Yildirim (2008).

O GLP é considerado uma mistura entre o propano ( $C_3H_8$ ) e butano ( $C_4H_{10}$ ). Propileno e butilenos estão presentes em pequenas concentrações. O GLP tem um alto aquecimento (a quantidade de calor liberada durante a combustão de uma quantidade específica) de  $12.467 \text{ kcal/m}^3$ , que é muito maior que o valor médio de calor da maioria do gás natural ( $9350 \text{ kcal/m}^3$ ). A Tabela 5 apresenta as principais propriedades do gás GLP (BAHADORI, 2014).

A técnica de soldagem a quente é um método alternativo para termoplásticos amorfos de alta temperatura, como a poli (éter-imida). Quando as duas amostras poliméricas amorfas acima das temperaturas de transição vítrea são contatadas entre si, a resistência mecânica é desenvolvida entre as interfaces responsáveis pela união dos polímeros. Esse mesmo conceito é aplicado na união dissimilar entre compósitos termoplásticos amorfos e a liga AA2024-T3. (KUMAR et al., 2018; STOKES, 1999).

Tabela 5 - Características típicas do gás GLP.

| <b>Propriedades</b>                      | <b>Propano</b> | <b>Butano</b> |
|------------------------------------------|----------------|---------------|
| Densidade do líquido ( $\text{g/cm}^3$ ) | 0,50 – 0,51    | 0,57 – 0,58   |
| Conversão (líquido/tonelada)             | 1968           | 1732          |
| Densidade do gás/ar                      | 1,40 – 1,55    | 1,90 – 2,10   |
| Teor de enxofre (%)                      | 0 - 0,02       | 0 - 0,02      |

Fonte: Bahadori (2014).

## 2.6 ESTUDOS DE SOLDAGEM ENTRE ALUMÍNIO-COMPÓSITO

Na literatura, há poucos relatos de soldagem aplicada para a união de materiais com propriedades físico-químicas tão distintas, mais especificamente considerando a liga AA2024-T3 (material de difícil soldabilidade) e os compósitos termoplásticos para uma comparação dos valores de LSS obtidos. A Tabela 6 apresenta os principais valores de LSS encontrados na literatura para a soldagem entre metal/polímero (AMEND; PFINDEL; SCHMIDT, 2013; GOUSHEGIR; DOS SANTOS; AMANCIO-FILHO, 2014; HUANG et al., 2018b; LIONETTO et al., 2018b; MITSCHANG; VELTHUIS; DIDI, 2013; NAGATSUKA et al., 2015; RODRÍGUEZ-VIDAL et al., 2018).

Tabela 6 - Valores de *Lap Shear* obtidos de laminados poliméricos soldados com alumínio em encontrados na literatura.

| <b>Material</b>                                         | <b>Processo</b>          | <b>LSS (MPa)</b> | <b>Referência</b>                        |
|---------------------------------------------------------|--------------------------|------------------|------------------------------------------|
| PPS/Fibra de carbono<br>AA2024-T3                       | Soldagem<br>por Fricção  | 27,0             | Goushegir, Santos e Amancio-filho (2014) |
| PEEK<br>Alumínio 6061-T6                                | Soldagem<br>por Fricção  | 20,0             | Huang et al. (2018a)                     |
| Poliamida 6<br>Alumínio 5052                            | Soldagem<br>por Fricção  | 12,9             | Nagatsuka et al. (2015)                  |
| Epóxi/Fibra de carbono<br>Filme de PA6<br>Alumínio 5754 | Soldagem<br>Ultrassônica | 22,7 – 34,8      | Lionetto et al. (2018b)                  |
| PA66/Fibra de carbono<br>Alumínio 5754                  | Soldagem<br>por Indução  | 15,0             | Mitschang, Velthuis e Didi (2013)        |
| Poliamida/Fibra de vidro<br>Aço de baixa liga HC420     | Soldagem a<br>Laser      | 9,6              | Rodríguez-Vidal et al. (2018)            |
| PC, PA6 e PA66-GF30<br>Alumínio 5182                    | Soldagem a<br>Laser      | 13,4 – 19,7      | Amend, Pfindel e Schmidt (2013)          |

Fonte: Produção do próprio autor.

Como observado a partir da Tabela 6, o método de soldagem por fricção é o mais usual e consolidado para a união entre metais e compósitos poliméricos. No estudo realizado por Goushegir, Santos e Amancio-filho (2014), a realização do processo de soldagem por fricção (FSpJ) descrita pelo autor, consiste em uma ferramenta não consumível, consistindo de três

partes (anel de aperto, bucha e pino), que são montados de forma coaxial e que é usada para gerar o calor friccional.

A bucha rotativa é mergulhada na superfície metálica até uma profundidade pré-definida. Devido a fricção entre a bucha e o metal, a temperatura sobe localmente abaixo do ponto de fusão do metal, causando assim um amolecimento local da liga metálica. O pino então é inserido contra o metal amolecido para cobrir o desgaste feito na chapa metálica e, finalmente, a ferramenta é retraída e a união se consolida sob pressão. A camada fundida é então consolidada sob pressão e induz forças de adesão entre o metal e o compósito.

No processo de soldagem por OFW utiliza-se o conceito da transferência de calor e a união é realizada a partir do intertravamento mecânico e forças de adesão na interface metal-polímero, assim como descrito por Ageorges e Ye (2001) e Goushegir, Santos e Amancio-filho (2014). Entretanto, apesar do maior valor de LSS obtido da Tabela 6 envolvendo a liga AA2024-T3 (27 MPa), o método por fricção pode ocasionar, em alguns casos, a degradação dos materiais envolvidos, havendo a possibilidade da degradação excessiva do polímero e danos a rede de fibras.

O método de soldagem por OFW, diferentemente da soldagem por fricção, não causa a degradação dos materiais envolvidos (dependente da proteção efetiva do laminado a exposição da chama) e, além disso, não há relatos na literatura a respeito desse processo para a junção entre metal/polímero, sendo um método novo e alternativo de soldagem que demanda mais estudos e aprimoramento.

## 2.7 DEFEITOS ENVOLVIDOS DA SOLDAGEM NA LIGA AA2024-T3

As ligas AA2024-T3, são ligas que possuem excelentes propriedades mecânicas tais como alta ductilidade, alta resistência à fadiga e tenacidade à fratura em temperaturas elevadas, resistência a danos e alta relação resistência/peso. Além disso, possuem características intrínsecas críticas, como a alta condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica (grande retração de solidificação), alta refletividade ao laser, elementos de baixo ponto de ebulição, alta solubilidade de hidrogênio no estado líquido e dificuldade de soldagem por fusão (AHN et al., 2017a).

Porosidades, tensões térmicas e superficiais, inclusões de solda e evaporação de elementos de liga são alguns defeitos presentes em soldagem das ligas AA2024-T3. Da mesma

forma, defeitos geométricos, como desalinhamento e rebaixamento, podem prejudicar a qualidade das juntas de alumínio soldadas a laser (OLADIMEJI; TABAN, 2016).

O trincamento a quente é um mecanismo de fratura em alta temperatura e pode se referir a fissuras de solidificação que ocorrem intergranularmente ao longo do limite do contorno de grão de solda durante a solidificação (AHN et al., 2018). A sensibilidade ao trincamento a quente da liga AA2024-T3 pode ser reduzida controlando-se o processo de solidificação durante a soldagem, otimizando os parâmetros de soldagem e evitando a composição sensível à trinca no metal de solda a partir do uso de um metal de adição, adequado com um menor ponto de solidificação que o do metal base (AHN et al., 2017a; CICAL et al., 2005; SHEIKHI et al., 2009).

A trinca por solidificação é extremamente prejudicial à integridade das soldas em alumínio. Essas trincas são regiões de locais de alta concentração de tensão e as falhas de soldagem geralmente começam nessas regiões (OLADIMEJI; TABAN, 2016). As trincas de solidificação ocorrem devido a dois fatores conjuntos: a composição química da poça de fusão e as tensões geradas durante a solidificação e o resfriamento da junta (OLADIMEJI; TABAN, 2016; TRINCAS, 1997).

A liga AA2024-T3 é uma das ligas de alumínio mais vulneráveis a trinca por solidificação durante a soldagem a laser. Os parâmetros de soldagem e a microestrutura da solda resultante influenciam a severidade da fissuração em ligas de alumínio. Consequentemente, a morfologia da trinca depende muito da microestrutura do metal de solda e do fator de sobreposição (SHEIKHI et al., 2009).

Ahn et al. (2018) realizou a soldagem a laser por Yb: fibra em ligas AA2024-T3 e concluiu que as soldas mais largas se mostraram menos sensíveis à trinca do que as soldas estreitas, portanto, uma velocidade de soldagem menor produziu, em média, soldas de maior qualidade, desde que houvesse uma densidade de potência suficientemente alta. Portanto, é crucial examinar completamente as propriedades, parâmetros e o desempenho da solda em ligas AA2024-T3. Além dos defeitos por trincas de solidificação, a porosidade é um defeito recorrente em soldagens que envolvem ligas de alumínio da série 2xxx. As porosidades são pequenos poros internos ou externos ou grandes vazios irregulares (bolhas de gás) formados durante o processo de soldagem por fusão ou durante a fase de solidificação do processo (OLADIMEJI; TABAN, 2016).

Alta solubilidade de hidrogênio, instabilidade, oscilação e colapso ou fechamento intermitente da cavidade do *keyhole* e vapores metálicos (evaporação de elementos de liga

voláteis como magnésio) são algumas maneiras em que a porosidade é formada durante a soldagem em ligas de alumínio (HABOUDOU et al., 2003; OLADIMEJI; TABAN, 2016; TU; PALEOCRASSAS, 2002).

Nos estudos realizados por Ahn et al. (2017b) examinaram como a escolha de gás de proteção, incluindo argônio e hélio, afetou a formação de defeitos de soldagem e a microestrutura da liga AA2024-T3 soldada a laser de fibra e concluiu que a melhor qualidade de soldagem foi obtida usando hélio em baixas velocidades de soldagem, devido ao efeito reduzido do plasma. Como o hélio tem um potencial de ionização mais alto que o argônio, consequentemente, minimiza a formação de porosidade.

Na soldagem a laser, o estado do regimento *keyhole* pode provocar o aprisionamento de gases dentro dos metais de solda, e consequentemente, formar porosidade de gás na zona de fusão nas juntas soldadas (OLADIMEJI; TABAN, 2016).

## 2.8 DEFEITOS EM LAMINADOS

Devido às características anisotrópicas dos materiais compósitos, diferentes modos de falha podem ocorrer simultaneamente ou sucessivamente antes de toda a estrutura falhar. Geralmente, a falha de compósitos sob carga estática ocorre por uma combinação de vários mecanismos de interação que levam à ruptura final. No caso de laminados, assim como em uma única lâmina, podem ser encontrados diferentes tipos de mecanismos de danos (ALTABEY; NOORI, 2017).

A fratura dos materiais compósitos pode ser dividida em três formas distintas, sendo estas: intralaminar, translaminar e interlaminar. Fratura intralaminar se refere a ruptura das camadas do compósito que pode acontecer sob a forma de ruptura da matriz, ruptura das fibras e a descolamento fibra/matriz. A fratura translaminar envolve uma significativa ruptura/arrancamento das fibras, pois este modo é orientado transversalmente ao plano de carregamento do laminado (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2005).

A fratura interlaminar ou delaminação é um dos tipos de falha mais importantes e comuns em estruturas de materiais compósitos. A delaminação ou modo de fratura interlaminar é o mecanismo de dano interlaminar que se manifesta com maior potencial e é um fator limitante da vida útil de um componente estrutural aeronáutico. Essas falhas interlaminares são pronunciadas e se propagam entre as camadas adjacentes sob condições estáticas ou dinâmicas (CÂNDIDO et al., 2012; RAMÍREZ et al., 2018). Esse tipo de fratura descreve falhas

orientadas entre as camadas, ocorrendo no plano do laminado, fraturando principalmente a matriz, com pouca ou nenhuma fratura de fibra, podendo haver a formação do mecanismo de ponte de fibra (*Fibre bridging*), tendo a propagação da trinca pela matriz e a fibra formando uma “ponte”, interligando as duas superfícies com a da matriz fraturada e gerando um concentrador de tensões e, por consequência, a falha do material (KHAN, 2019; WANG et al., 2009).

Tornou-se evidente que, ao longo dos anos, a fratura interlaminar é potencialmente um dos principais processos de falha que limita a vida de um determinado componente de compósito, principalmente devido à ausência de reforço ortogonal ao plano das fibras. Isso se torna ainda mais crítico em compósitos soldados (DE BAERE et al., 2012; REIS et al., 2018).

Além disso, diferentes cargas podem operar sobre uma trinca presente em um material compósito. O modo de carga I é o modo de abertura ou carregamento de tração, onde a carga é aplicada perpendicular à superfície da trinca; o modo de carga II é o modo de deslizamento ou cisalhamento no plano, onde as superfícies da trinca deslizam umas sobre as outras; por fim, o modo de carga III é o rasgamento ou cisalhamento fora do plano, onde as superfícies da trinca se movem em direções opostas paralelamente à borda dianteira da trinca (CALLISTER, 2012).

Geralmente, as principais falhas ocorrem na interface entre a matriz e o reforço (isto é, o descolamento), principalmente nos defeitos, que estão sempre presentes nos compósitos, principalmente devido ao processo de fabricação. Os tipos mais comuns de modos de falha em laminados discutidos são apresentados pela Figura 11 (ALTABEY; NOORI, 2017; TALREJA, 2008).

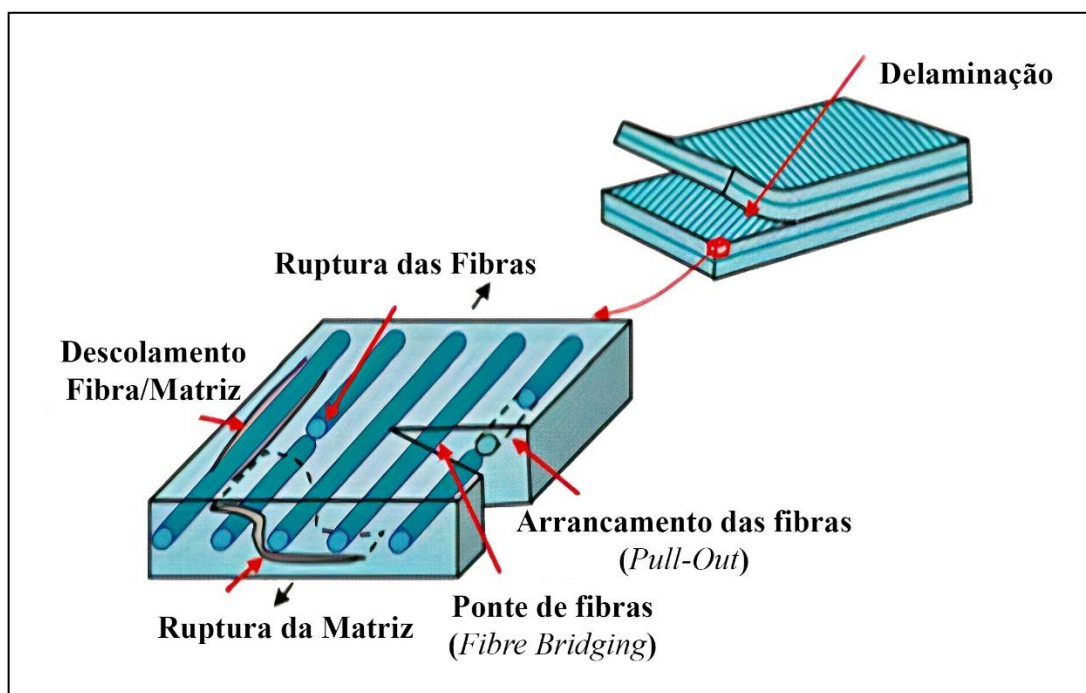
Na soldagem, a delaminação ocorre por várias razões, podendo-se destacar: devido à liberação de energia elástica armazenada nas fibras de carbono quando a viscosidade da matriz diminui na solidificação, expansão do ar aprisionado, tensões térmicas, fluxo excessivo de resina devido à pressão excessiva do processo e compressão insuficiente de ar na linha de união do material termoplástico devido à pressão insuficiente do processo (MIZUKAMI et al., 2015).

Os vazios presentes nos laminados termoplásticos, por consequência da soldagem, tendem a reduzir o desempenho mecânico, tais como resistência ao cisalhamento interlaminar, resistência à flexão e resistência à compressão (SHI; VILLEGAS; BERSEE, 2015; MONTORO et al., 2011).

De fato, os vazios sempre surgem durante os processos convencionais de fabricação de compósitos, sendo a presença de vazios permitida, embora restrita a porcentagens baixas.

Entretanto, vazios em grandes quantidades são concentradores de tensão e podem atuar como pontos de iniciação de trinca (PACIORNIK; ALMEIDA, 2010).

Figura 11 - Modos de falha em compósitos reforçados com fibra.



Fonte: Adaptado de Altabey e Noori (2017).

A presença de vazios tem uma influência sobre o desempenho mecânico de juntas soldadas. Portanto, entender os mecanismos de formação de vazios na soldagem de compósitos termoplásticos é importante para otimizar os processos de soldagem que envolvem esses tipos de materiais (SHI; VILLEGAS; BERSEE, 2015).

No estudo realizado por Dubé et al. (2012), a presença de vazios em compósitos PEI/fibra de vidro e carbono soldados pelo processo de resistência elétrica foi atribuído a dois fenômenos: (1) uma redução da pressão na junção dos laminados causada pelo amolecimento excessivo do polímero e (2) a resistência ambiental relativamente baixa do polímero de PEI.

Esse amolecimento excessivo foi causado devido ao aperto excessivo dos polímeros, observados durante a operação de soldagem e a falta de pressão nas mediações das bordas. À medida que a viscosidade do polímero diminui, o polímero flui para fora da união, deixando lacunas não preenchidas no elemento de aquecimento. Associado a este comportamento, uma menor resistência ambiental, ou seja, uma maior absorção de umidade do polímero PEI, facilita a presença de vazios.

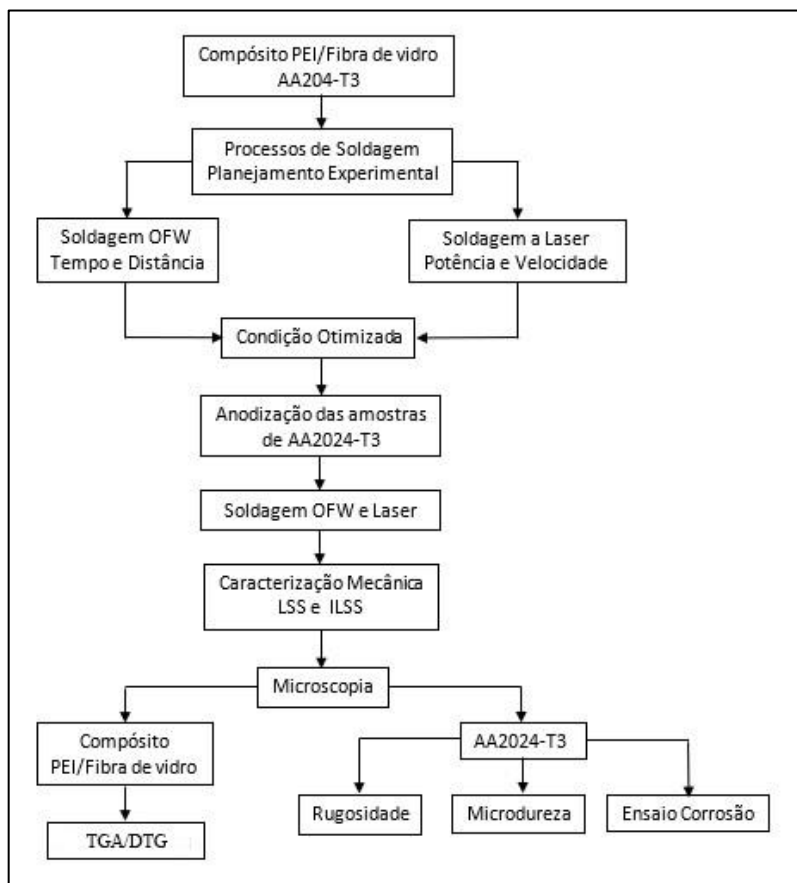
Em compósitos termoplásticos, os vazios podem ser derivados de elementos voláteis como ar aprisionado durante a moldagem, umidade e/ou solventes residuais no laminado, bem como causados por pressão de compactação insuficiente durante a soldagem, ou nucleados sob baixos níveis de tensão ou por deformação plástica da matriz polimérica (BARBOSA et al., 2018; SHI; VILLEGAS; BERSEE, 2013).

Segundo Barbosa et al. (2018), a partir da presença de vazios na matriz, mais particularmente na região interfacial da união, o processo de falha pode ser nucleado com a propagação de danos ao longo da interface fibra / matriz, o que pode resultar em falhas intralaminares e interlaminares.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado seguindo os desenvolvimentos dos métodos de soldagem por OFW e a laser Yb: fibra, assim como a caracterização dos materiais soldados. As etapas realizadas neste trabalho encontram-se apresentadas de forma resumida na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma apresentando em síntese o trabalho experimental realizado.



Fonte: Produção do próprio autor.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Compósito PEI/Fibra de vidro

O laminado termoplástico utilizado neste trabalho foi o PEI/Fibra de vidro, fornecido pela empresa Toray Advanced Composites. Estes laminados foram confeccionados com tecidos de fibra de vidro na configuração 8 HS, espessura nominal de 3,0 mm e configuração (0/90)<sub>5s</sub> contendo, aproximadamente, 50% em volume de reforço e aproximadamente 0,5% de

porosidade. Estes laminados são normalmente fabricados em moldes, processados a partir de sistemas *semipregs*, moldados em autoclave ou em prensas com aquecimento e resfriamento controlados.

As amostras dos laminados foram marcadas nas dimensões de 100 mm de comprimento por 25 mm de largura. Em seguida, as amostras foram cortadas em serra de fita, lixadas as laterais das amostras e marcadas as regiões para união (com uma área de 25x25 mm) e assim submetidas ao processo de soldagem.

### 3.1.2 Liga AA2024-T351

As ligas AA2024-T351 utilizadas neste estudo foram adquiridas comercialmente das empresas ALTO PARTS e FIBRAER - *Aeroservice* Comércio Peças/Manut. Aeron. LTDA, com uma espessura nominal de 3,5 mm, sendo sua composição química fornecida pela empresa FIBRAER e apresentada na Tabela 7. A Tabela 8 apresenta as principais características da liga utilizada neste trabalho, conforme fornecido pela empresa FIBRAER. A liga de alumínio utilizada possui uma espessura nominal de 3,5mm.

As amostras da liga AA2024-T3 foram marcadas nas dimensões de 100 mm de comprimento por 25 mm de largura. Em seguida, as amostras foram cortadas em guilhotina IMAG modelo T15ME (pertencente a FATEC de Pindamonhangaba) e marcadas as regiões para união (com uma área de 25x25 mm) e assim submetidas ao processo de soldagem.

Tabela 7 - Composição química nominal da liga AA2024-T351 utilizada no trabalho.

| Elemento | Al    | Cu   | Mg   | Si   | Fe   | Mn   | Zn   | Ti   | Cr   |
|----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| %        | 92,53 | 4,70 | 1,52 | 0,30 | 0,34 | 0,40 | 0,14 | 0,06 | 0,01 |

Fonte: Fibraer.

Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas da liga AA2024-T3.

| Propriedades                       | Valores   |
|------------------------------------|-----------|
| Limite de escoamento (MPa)         | 324       |
| Resistência a tração (MPa)         | 460       |
| Dureza (Brinell)                   | 120       |
| Ponto de fusão (°C)                | 500 – 640 |
| Condutividade térmica (cal/cms °C) | 0,29      |

Fonte: Fibraer.

## 3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Os processos desenvolvidos para a soldagem entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3 neste trabalho foram: a soldagem por Oxi-combustão (OFW) e a soldagem a laser por Yb: fibra.

### 3.2.1 Soldagem por Oxi-combustão (OFW)

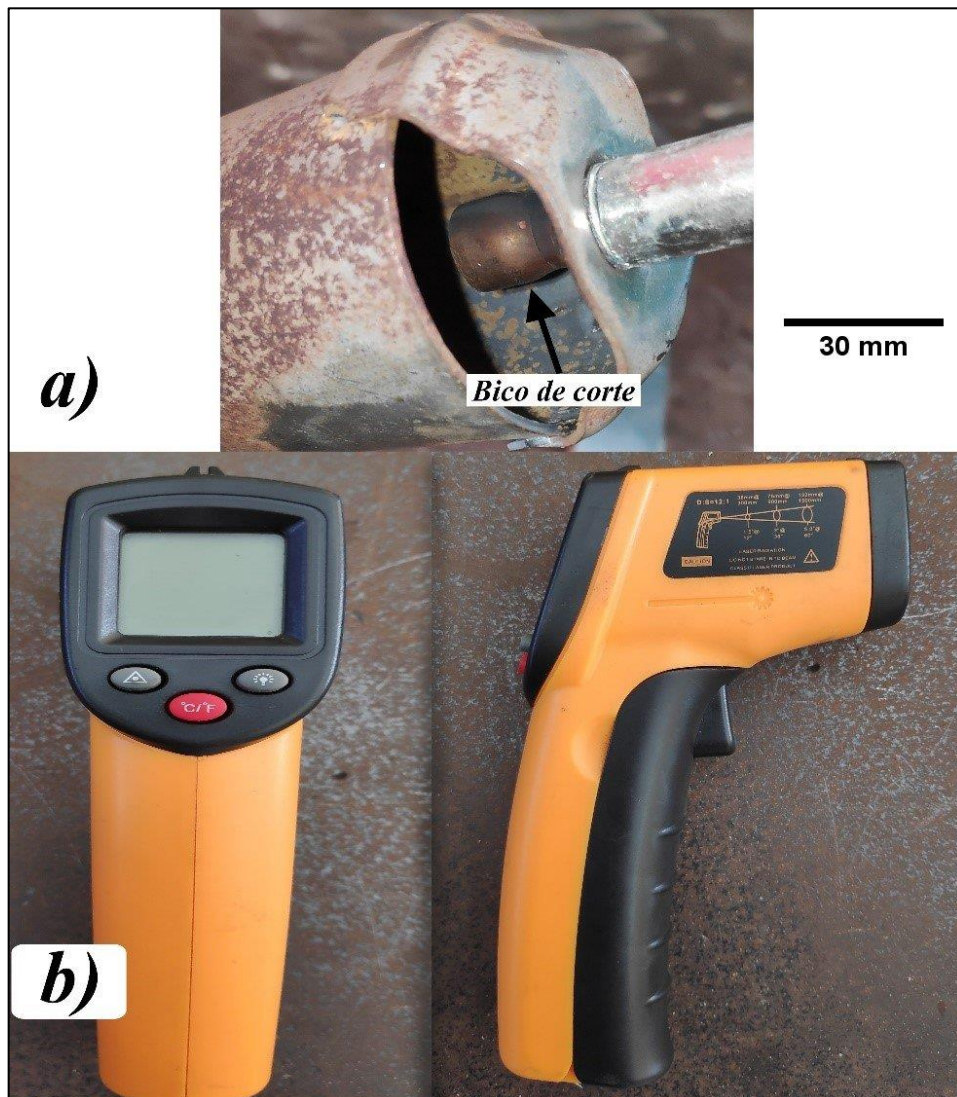
No presente estudo, o processo de soldagem por OFW consiste em um maçarico adaptado a um cilindro de gás, com um regulador de pressão no cilindro (Figura 13), onde a chama é concentrada, através de um bico de corte para maçarico de 8 mm (Figura 14-a) e aplicada na amostra da liga AA2024-T3 em contato direto com a amostra de compósito a ser soldada. A pressão do gás durante a soldagem é mantida constante a 5 psi. A temperatura foi medida com a utilização de um termômetro infravermelho com capacidade de até 600°C (Figura 14-b).

Figura 13- Regulador de pressão utilizado no processo OFW.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 14 - a) Bico de corte acoplado ao maçarico de soldagem OFW; b) pirômetro utilizado no estudo.



Fonte: Produção do próprio autor.

#### 3.2.1.1 Dispositivos de soldagem OFW

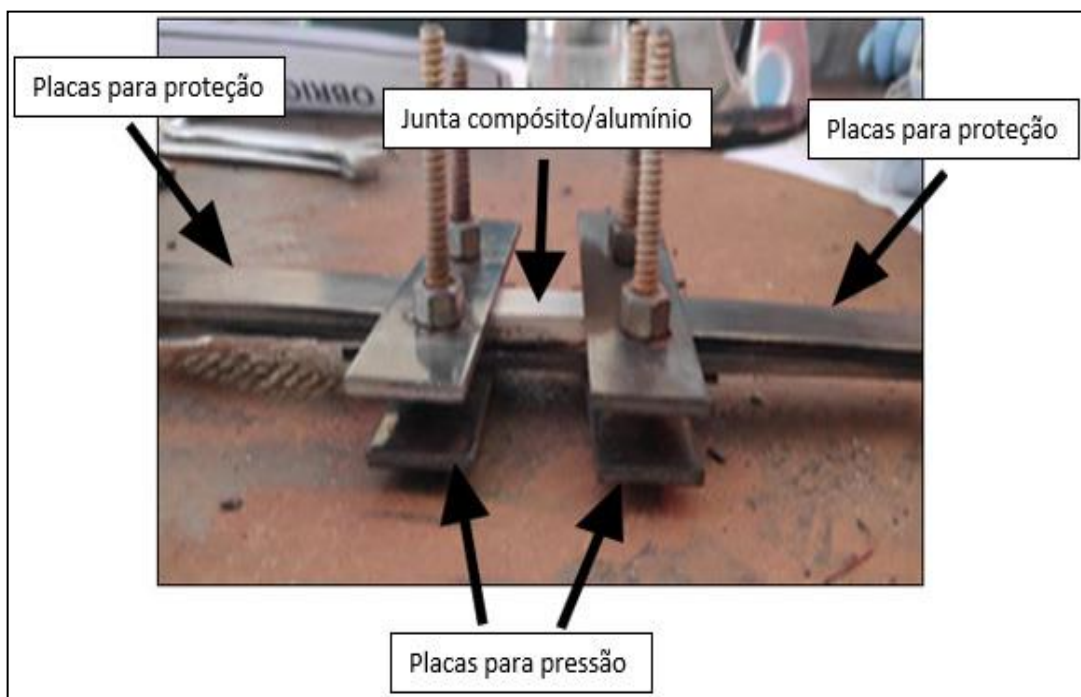
A soldagem por OFW foi estudada e adaptada visando o baixo custo de sua utilização para uma junção complexa que envolve materiais dissimilares. Partindo do mesmo princípio da soldagem a laser utilizada neste estudo, ou seja, via condução térmica, o processo consiste na aplicação da chama do gás GLP na liga AA2024-T3, aproveitando da sua alta capacidade de condução térmica, aquecendo-o em temperaturas em que se aproximam da temperatura de

transição vítrea do material compósito amorfo PEI (220°C), onde ocorre o amolecimento do material e, por conseguinte, a união entre estes dois materiais.

Para o sucesso da soldagem, é de fundamental importância que a interface entre os dois materiais a serem soldados esteja mantida em contato constante durante todo o processo, visando proporcionar um melhor resultado da união. Em atenção a isso, foram desenvolvidos dispositivos para a um melhor contato entre a liga AA2024-T3 e o compósito e que ao mesmo tempo protegesse o material compósito da chama aplicada do processo.

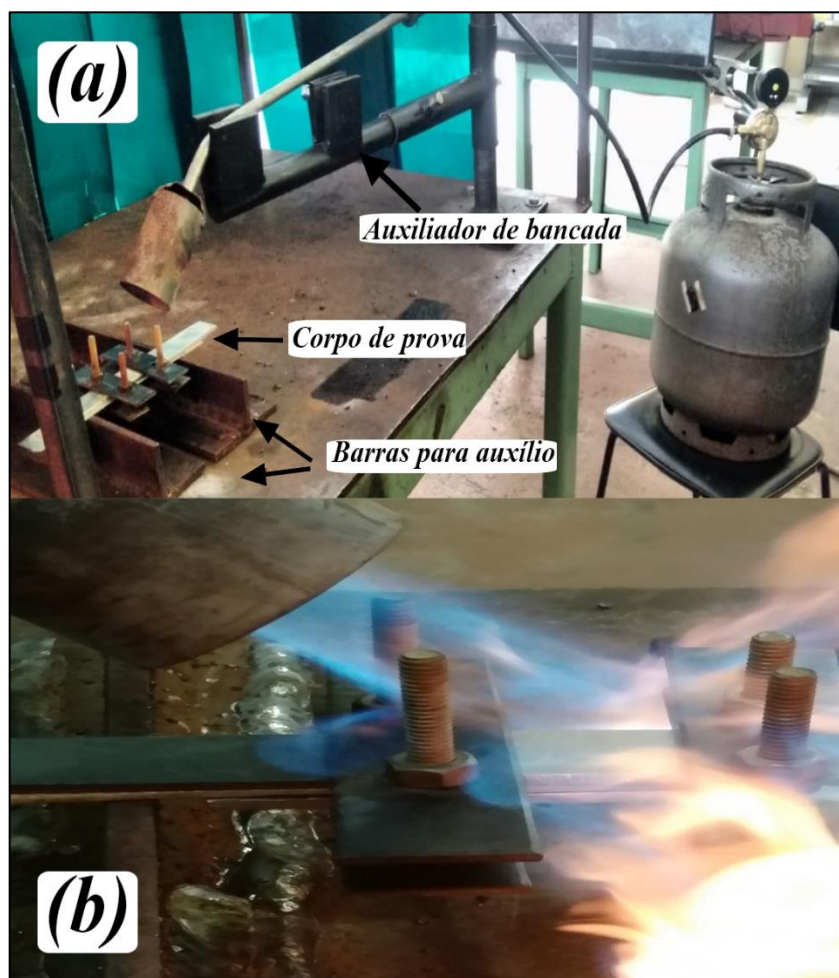
A Figura 15 apresenta o dispositivo inicial de soldagem, sendo este constituído de quatro placas de aço que foram colocados no sistema para a pressão, com o objetivo de manter o contato íntimo entre as amostras durante toda a soldagem. Duas placas de aço foram utilizadas para proteção do laminado da chama. A Figura 16 (a) apresenta o processo de soldagem por OFW em uma das amostras de compósito PEI/fibra de vidro e na liga AA2024-T3, utilizando o dispositivo. Já a Figura 16 (b) apresenta, em detalhes, a aplicação da chama para a realização da soldagem. O maçarico apresentado na Figura 16 (a) é acoplado a um auxiliador de bancada, para mantê-lo fixo durante todo o processo e manter a distância correta de soldagem e, além disso, são utilizadas duas barras de aço abaixo do dispositivo de soldagem para uma melhor regularidade na soldagem, como apresentado na Figura 16 (a).

Figura 15 - Dispositivo de soldagem OFW em detalhes.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 16 - Aplicação da soldagem por OFW: (a) montagem do sistema de soldagem; (b) aplicação da chama do processo em detalhes.



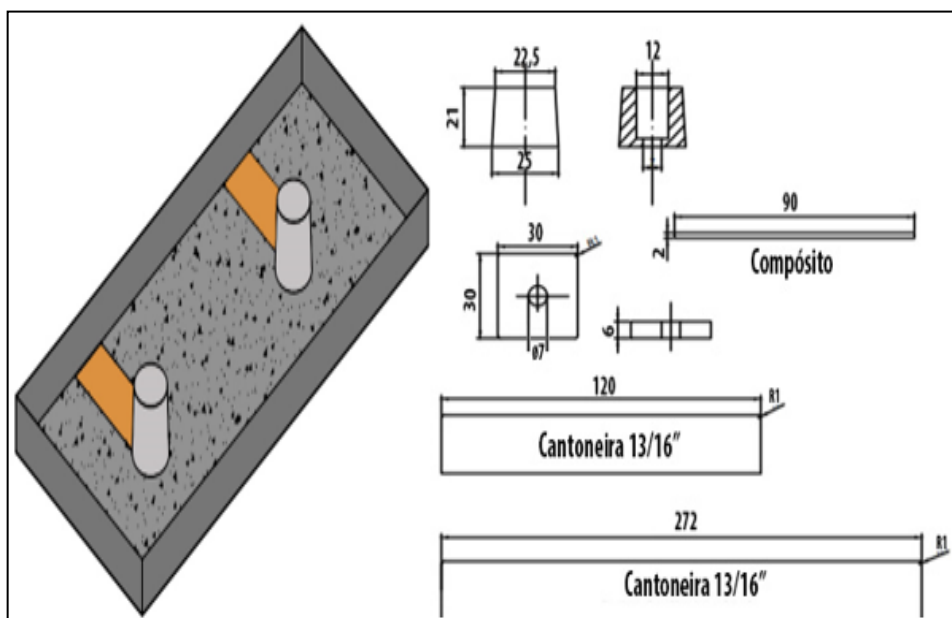
Fonte: Produção do próprio autor.

O método desenvolvido descrito e ilustrado anteriormente apresentou algumas limitações para a efetiva união entre os materiais estudados. A pressão do aperto dos parafusos não era controlada por um torquímetro específico para esse caso, resultando em amostras com pressão excessivas, causando a presença de delaminações e vazios em algumas amostras do compósito. Em alguns casos, a pressão não foi suficiente para manter o contato íntimo entre as amostras e, consequentemente, não houve a soldagem dos materiais. Além disso, o dispositivo falhava algumas vezes na proteção do laminado causando degradações ao longo da borda da junta soldada.

Em decorrência a esses defeitos, foi realizado um estudo para o aprimoramento do dispositivo para a soldagem por OFW, para redução da degradação do laminado e a obtenção de uma aderência da interface metal/polímero satisfatória, sem uma pressão excessiva sobre o

laminado. Dessa forma, foi construído um molde pré-determinado, para a produção de um dispositivo, baseado em uma cerâmica refratária. O desenho do molde e suas medidas (em mm) são apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Desenho esquemático do molde produzido.



Fonte: Produção do próprio autor.

O compósito e a liga AA2024-T3 são inseridos no molde para formarem uma área de rebaixo para o encaixe de ambos os materiais no dispositivo final, visando a realização da soldagem. Com a utilização desse molde, foram produzidas as cerâmicas para a produção do dispositivo. Neste caso, foi utilizada uma argamassa para assentamento e rejuntamento de tijolos (refratário QUARTZOLIT), onde 1148 gramas de argamassa foi compactada no molde com uma proporção de 200 mL de água para cada 2000 gramas de argamassa. Após isso, o molde foi levado a uma estufa em uma temperatura de 120°C durante 3 horas para a retirada de umidade do sistema. Em seguida, o molde foi mantido em um forno a uma temperatura de 400°C, durante 2 horas, para a sinterização do refratário. Por fim, o molde é retirado do forno e resfriado a temperatura ambiente. A Figura 18 ilustra o dispositivo utilizado após o resfriamento.

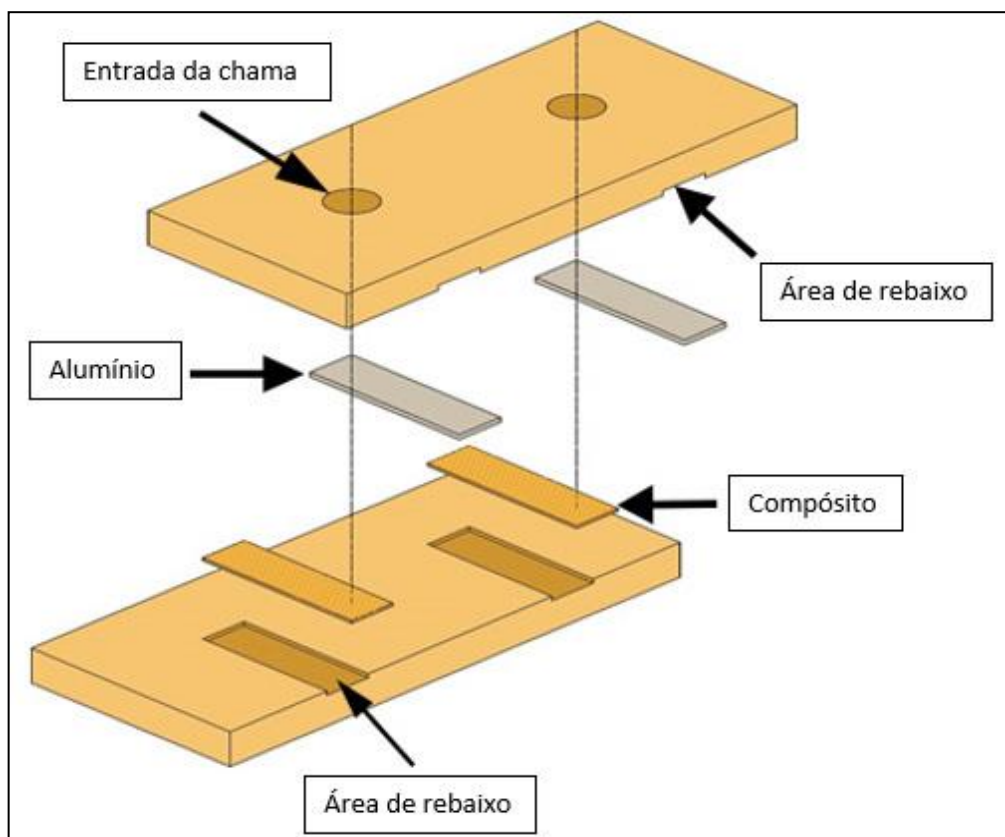
O material refratário processado de cerâmica é então retirado, com cuidado, do molde e, em seguida, é realizado um acabamento para uma melhor utilização do dispositivo refratário na soldagem por OFW. A Figura 19 exibe um desenho esquemático do dispositivo refratário final. Já a Figura 20 exibe o dispositivo sendo aplicado durante a soldagem por OFW.

Figura 18 - Material refratário produzido.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 - Desenho esquemático do dispositivo otimizado para a soldagem por OFW.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 20 - Aplicação do dispositivo na soldagem por OFW.



Fonte: Produção do próprio autor.

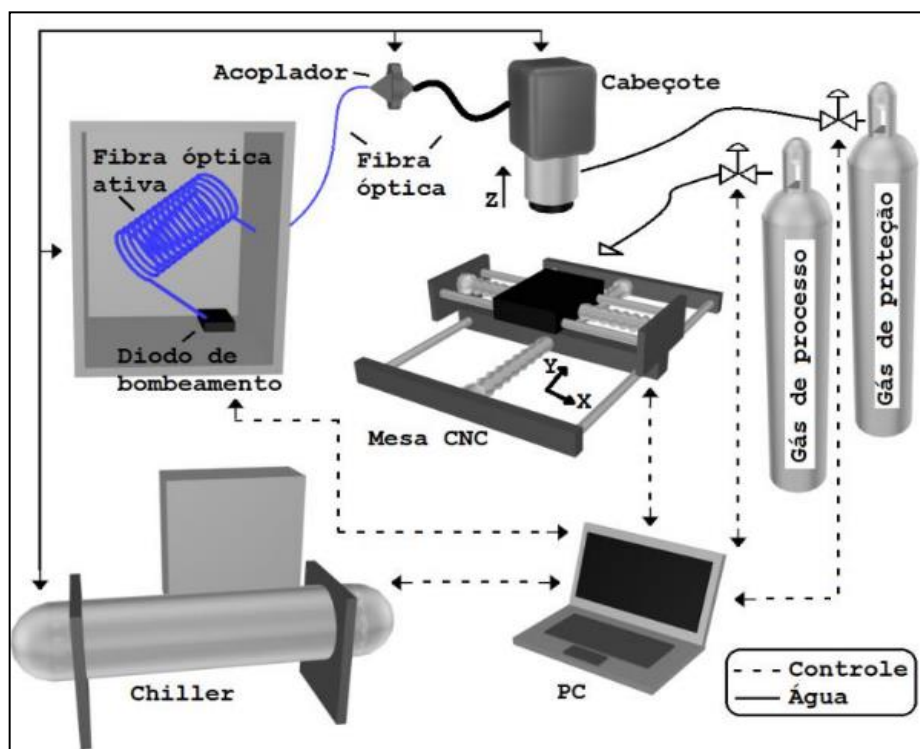
Observa-se, a partir da Figura 20, a utilização de placas de aço para manter o contato íntimo entre as amostras de compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 a serem soldadas, assim como o dispositivo anterior, entretanto, a pressão não é aplicada diretamente nas amostras como era realizado anteriormente, sendo esta agora aplicada diretamente em contato com o material refratário, fazendo com que o mesmo mantenha o contato íntimo e constante dos dois materiais durante todo o processo, reduzindo a influência da pressão no processo.

### 3.2.2 Soldagem a laser por Yb: fibra

A soldagem a laser foi realizada no Laboratório Multiusuário de Desenvolvimento e Aplicações de Lasers e Ótica (DedALO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv/DCTA). Com esta finalidade, foi utilizado um laser de fibra óptica dopada com Itérbio (Yb) (modelo YLS 2000, IPG photonics), com comprimento de onda de 1080 nm e potência de 2 kW. A fibra de saída tem 50  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 5 m de extensão, e é conectada a uma unidade de acoplamento, fazendo a conexão com uma segunda fibra com 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 10 m de comprimento. Este laser fica inserido em uma cabine de processamento em alumínio de aproximadamente 3 m x 3 m x 3 m, equipada com sistemas de gases auxiliares de processo e

de exaustão de fumos (COELHO; LIMA; COSTA, 2013). A esquematização do laser é apresentada na Figura 21.

Figura 21 - Configuração esquemática do processo a laser por fibra óptica.

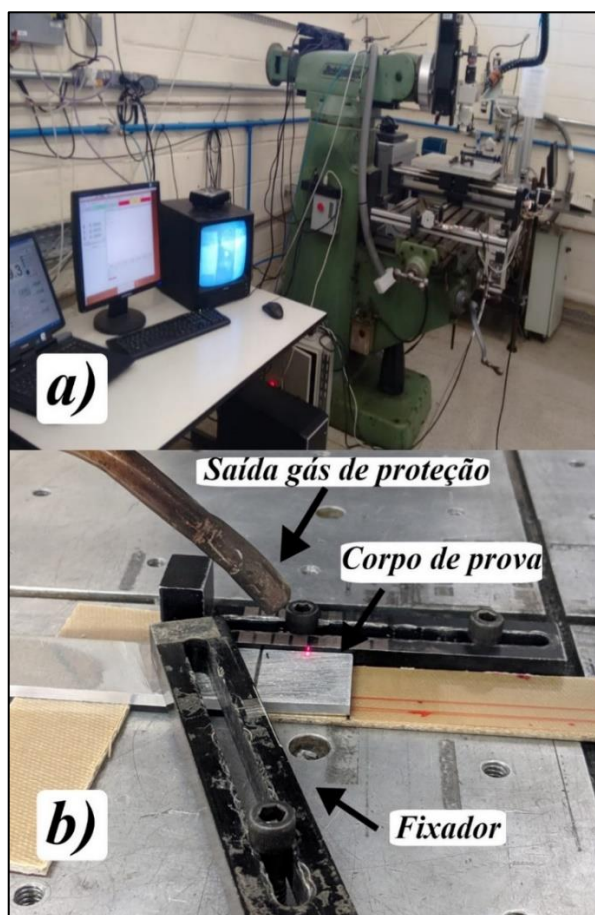


Fonte: COELHO, LIMA E COSTA (2013).

O porta amostras foi montado sobre uma mesa CNC com dois eixos (XY) acoplados em dois motores controlados por um software de computador. Um eixo Z-vertical com resolução de 1  $\mu\text{m}$  foi incorporado à mesa para o controle da distância focal. Além da movimentação, o software faz o controle do sistema de gases de processo, que comporta quatro tipos diferentes de gases: nitrogênio, oxigênio, argônio e hélio (COELHO; LIMA; COSTA, 2013).

A aplicação da soldagem a laser foi realizada por meio do modo em cheio (*bead on plate*), onde o laser é aplicado diretamente na superfície da placa da liga de alumínio e não na região de soldagem entre os materiais dissimilares. Com a aplicação do laser na superfície da liga de alumínio, a união entre a liga AA2024-T3 e o compósito polimérico foi obtida por meio de condução térmica. A Figura 22 apresenta o processo de soldagem a laser Yb: fibra realizado.

Figura 22 – a) Equipamento soldagem a laser Yb: fibra utilizado no estudo; (b) soldagem a laser Yb: fibra entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3 em detalhes.



Fonte: Produção do próprio autor.

Um fator fundamental para este tipo de soldagem é o aporte térmico aplicado na região da liga de alumínio, sendo de fundamental importância manter os parâmetros corretos para essa aplicação do processo. O aporte térmico domina as taxas de resfriamento na soldagem e, portanto, afeta a microestrutura do metal de solda e da zona afetada pelo calor, afetando diretamente a microestrutura da liga de alumínio e suas propriedades mecânicas (OLADIMEJI; TABAN, 2016).

### 3.3 PLANEJAMENTO E ANÁLISES DE EXPERIMENTOS

Com a obtenção dos valores mínimo e máximo de parâmetros de um determinado processo, foi possível a sua otimização a partir de estudos estatísticos denominado planejamento experimental. Segundo ABRAHÃO (2015), o planejamento experimental

consiste em uma ferramenta essencial, dentro da engenharia, para o desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos em utilização sendo o principal objetivo a otimização.

Em uma otimização de processo é necessário conhecer, principalmente, o número de variáveis independentes a serem estudadas para maximizar ou minimizar um valor de uma variável resposta que forneça o desempenho do sistema em estudo, com aplicação de trabalhos de pesquisa ou mesmo em processos industriais (GALDÁMEZ, 2002).

Dentre as técnicas mais utilizadas do projeto e análise de experimentos, será aplicado neste estudo o planejamento fatorial completo  $2^k$  que, segundo JÚNIOR (2003), permite a varredura completa na região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis, em processos que já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demanda elevados tempos e custos.

O processo experimental dessa técnica, como relatado por GALDÁMEZ (2002), consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental, interpretando e determinando os efeitos principais e de interação dos fatores investigados e assim, poder identificar as melhores condições experimentais do produto ou do processo.

A aplicação desse conceito envolve um método denominado de *central composite design* (CCD). Segundo JÚNIOR (2003), este método contém um fatorial completo ou fracionário, um design com um determinado número de pontos centrais e, adicionalmente, apresenta um grupo de níveis extras denominados de pontos estrela, os quais permitem estimar o comportamento da curvatura de resposta.

Por meio do programa estatístico Designer Express, versão 6.0.6, foram obtidas todas as condições experimentais para este estudo adotando-se o planejamento experimental fatorial completo como os pontos axiais. Antecipadamente foi necessário fazer soldagens preliminares a fim de determinar por cada técnica os limites de temperatura e tempo (para ambos os processos) levando em consideração a degradação dos materiais por análise visual. Ainda, com o intuito de se aplicar a otimização dos parâmetros de soldagem a partir de um planejamento fatorial do tipo CCD, foram determinados k fatores ( $k = 2 =$  tempo de soldagem e distância da tocha para o processo por OFW e potência e velocidade de soldagem para o processo a laser), um *design* com um determinado número de pontos centrais (nesse trabalho, foram feitas cinco replicatas no ponto central), e adicionalmente apresenta um grupo de níveis extras denominados de pontos axiais em um CCD, sendo este igual ao dobro do número de fatores envolvidos no experimento ( $2^2 = 4$ ). Portanto, tendo-se  $(4+4) + 5 = 13$  experimentos, considerando o teste de

LSS como a variável resposta. Os níveis reais e codificados das variáveis em estudo para a junção entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3, soldados por OFW e laser, são apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10, respectivamente.

Tabela 9 - Níveis reais e codificados para as variáveis tempo (s) e distância (mm) da soldagem por OFW, avaliadas segundo planejamento experimental para a junção entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3.

| Variáveis      |             | Níveis    |    |     |     |           |
|----------------|-------------|-----------|----|-----|-----|-----------|
| Reais          | Codificadas | $-\alpha$ | -1 | 0   | +1  | $+\alpha$ |
| Tempo (s)      | X1          | 84        | 90 | 105 | 120 | 126       |
| Distância (mm) | X2          | 28        | 30 | 35  | 40  | 42        |

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 10 - Níveis reais e codificados para as variáveis potência (W) e velocidade (mm/s) da soldagem por laser, avaliadas segundo planejamento para a junção entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3.

| Variáveis         |             | Níveis    |      |      |      |           |
|-------------------|-------------|-----------|------|------|------|-----------|
| Reais             | Codificadas | $-\alpha$ | -1   | 0    | +1   | $+\alpha$ |
| Potência (W)      | X1          | 1290      | 1300 | 1325 | 1350 | 1360      |
| Velocidade (mm/s) | X2          | 0,9       | 1,0  | 1,3  | 1,5  | 1,6       |

Fonte: Produção do próprio autor.

Com o propósito de assegurar a confiabilidade na análise estatística realizada, neste estudo optou-se também pela realização da análise de variância (ANOVA).

A análise de variância é um procedimento estatístico, que se refere à soma dos quadrados calculados a partir das informações retiradas do processo. Esta é utilizada para medir o efeito individual dos fatores (PANNEERSELVAM; ARAVINDAN; NOORUL HAQ, 2012). Segundo Moldavski e Cohen (1996), equações podem ser estatisticamente validadas a partir dos seguintes testes: 1) Análise de variância (ANOVA) que determina a significância de cada termo e fornece estimativa da qualidade do ajuste; 2) Coeficiente de correlação ( $R^2$ ); 3) Falta de ajuste, que indica se a diferença entre os valores experimentais e os valores calculados pelo modelo podem ser explicados pelo erro experimental. Segundo SHEIKH-AHMAD et al. (2019), quanto menor o valor F, menor a probabilidade de os resultados serem aleatórios. O

nível de significância  $\alpha$  é o limite máximo com o qual os valores F são medidos e seu valor encontra-se associado ao nível de confiança dos resultados.

Neste trabalho, foi adotado como critério da análise que uma determinada variável afetou estatisticamente a resposta, quando o nível de significância obtido for inferior a 5 %, ou seja, um nível de significância estatística de 95%. Valores de " $\alpha > F$ " menores que 0,05 indicam que termos do modelo são significativos (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2003; ABRAHAO, 2015). O nível de confiança aqui significa que, se o experimento fosse repetido diversas vezes, os mesmos resultados seriam obtidos 95% do tempo (SHEIKH-AHMAD et al., 2019). O software *Design-Expert 6.0* foi também empregado para a determinação dos valores máximos de tensão de ruptura (MPa) das juntas soldadas, possíveis de serem obtidos dentro da faixa de valores estudados.

Neste caso, o *software* executa um algoritmo de otimização numérica baseado na função de “desejabilidade” e também fornece os valores referentes à análise de variância (ANOVA). De posse da construção do modelo, a significância do mesmo é verificada por meio da análise de variância, sendo que este teste avalia se o modelo é estatisticamente significativo. Pelo ANOVA também é possível verificar quais são os termos significativos do modelo e quais podem ser removidos. Os modelos são ajustados por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que representa o percentual de variação na resposta explicada pelo modelo construído. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mede quanto da variabilidade total dos dados é explicada pelo modelo de regressão. Quanto maior  $R^2$ , mais a variação total é explicada. Em relação a isso, este coeficiente tem-se o  $R^2$  ajustado ( $R^2$  (adj.)), que leva em consideração o fato de que o  $R^2$  tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população (RODRIGUES; IEMMA, 2005; ABRAHAO, 2015). Um valor de F é qualquer teste estatístico no qual tenha uma distribuição F sob a hipótese nula. Este é utilizado com mais frequência na comparação de modelos estatísticos que foram ajustados a um conjunto de dados, a fim de identificar o modelo que melhor se ajusta à população da qual os dados foram amostrados (TURNER, 2006).

### 3.4 ANODIZAÇÃO DA LIGA AA2024-T3

Visando a realização de um estudo sistemático para adquirir maior aderência da liga AA2024-T3 no compósito PEI/fibra de vidro e, conseqüentemente, melhores resultados de resistência à ruptura da união entre compósito/alumínio, foi realizada a anodização das amostras

da liga AA2024-T3. Como relatado por AGEORGES e YE (2001), o mecanismo de ligação entre o polímero e o metal baseia-se no intertravamento mecânico do PEI com a microporosidade da camada de óxido de superfície criada no substrato de alumínio pela anodização, ou seja, a tendência é uma maior aderência efetiva na junção por soldagem no compósito PEI/fibra de vidro com a liga AA2024-T3 anodizada.

As amostras da liga AA2024-T3 anodizadas para a realização do ensaio de LSS foram previamente cortadas, com 100 mm x 25 mm x 3,5 mm. As dimensões das amostras são conforme a norma ASTM D1002, onde metade do comprimento de 100 mm foi exposta ao processo de anodização.

As amostras foram lavadas com água e detergente neutro e secas com secador em temperatura ambiente. Então foram limpas com acetona para garantir a máxima remoção de sujeira e gordura que pudessem envolver as amostras.

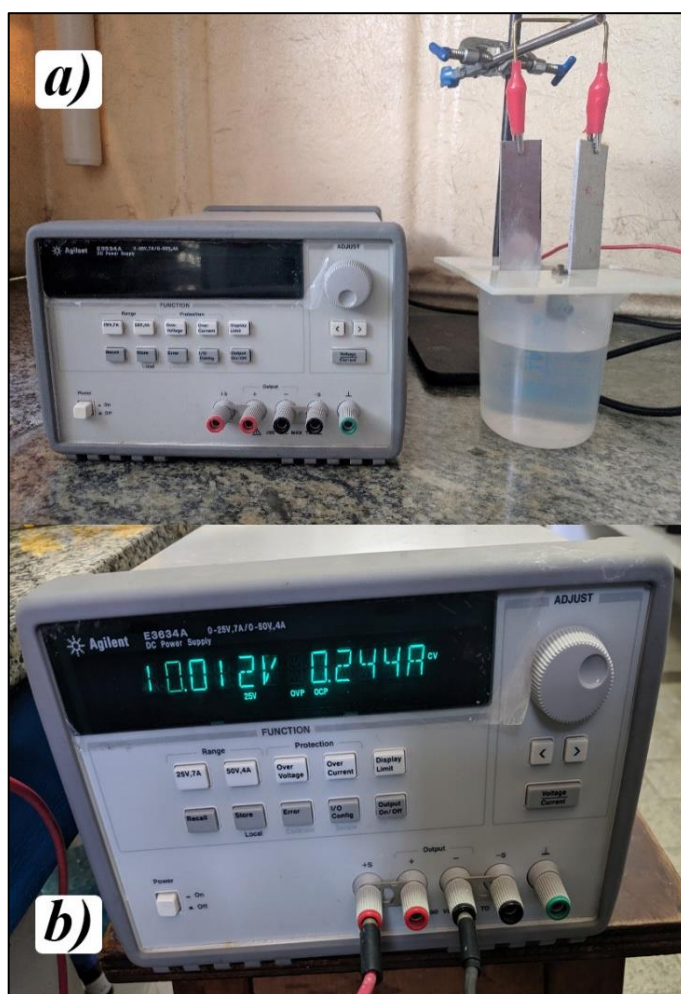
Antes de serem anodizadas, as amostras passaram por um processo de decapagem química. Segundo Santos (2017), este processo é importante para garantir um bom resultado da anodização, pois ajuda na uniformização superficial das amostras, deixando uma superfície mais propícia para a anodização. Neste processo, as amostras da liga AA2024-T3 são colocadas em um meio extremamente básico para oxidação e então são colocadas em um meio ácido para remoção do óxido superficial.

A solução básica utilizada foi uma solução de NaOH 10% em massa. O processo de decapagem química foi realizado a aproximadamente 60 °C, sendo cada amostra mergulhada neste banho por 60 segundos. Após a limpeza química, as amostras foram imersas em ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 65% em massa durante 90 segundos a temperatura ambiente. Após a neutralização da base com o meio ácido, as amostras foram abundantemente enxaguadas com água corrente e depois com álcool isopropílico. Por fim foram secas com secador.

A anodização por corrente contínua foi realizada em um béquer de vidro de 650 mL, suficiente para acomodar as amostras da liga AA2024-T3 e os contra-eletrodos. Utilizou-se uma solução de ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) 10% em massa, uma fonte de alimentação CC Agilent, modelo E3634A (25 V – 7A), dois contra eletrodos de cobre e um termostato para garantir a estabilidade da temperatura do banho, além de um borbulhador para manter a agitação do banho. Em seguida, as amostras foram anodizadas durante 10 minutos sob uma tensão elétrica de 10 V. A estabilização da corrente elétrica ocorreu por volta de 0,24 A/cm<sup>2</sup> (com densidade de corrente de 5 mA/cm<sup>2</sup>). A Figura 23 exhibe o processo de anodização da liga AA2024-T3. Após a realização do processo de anodização as amostras foram lavadas abundantemente em

água corrente e então com álcool isopropílico. Em seguida, as amostras foram secas em estufa por 30 minutos a 60°C. Para a realização da soldagem e evitar a influência da anodização no processo, um lado das amostras da liga AA2024-T3, que seriam expostas a chama GLP e ao laser, foram previamente lixadas, mantendo-se a anodização apenas na interface entre os materiais a serem soldados.

Figura 23 - a) Célula eletrolítica utilizada no processo de anodização; b) estabilização da corrente elétrica do processo de anodização.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS LAMINADOS E A LIGA

Após a realização da soldagem, a caracterização dos laminados PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3 foi realizada com o objetivo de estudo do comparativo dos efeitos do processo

de soldagem por OFW e a laser nas propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas destes materiais.

### 3.5.1 Caracterização Mecânica

#### 3.5.1.1 Ensaio de *Lap Shear* (LSS)

O ensaio de LSS foi realizado visando avaliar a qualidade da união entre o compósito polimérico e a liga de alumínio soldados a partir dos processos a laser e por OFW. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios da SHIMADZU, modelo AG-X, com uma célula de carga de 50 kN, pertencente ao Departamento de Tecnologia e Materiais (DMT) da FEG/Unesp - campus de Guaratinguetá. O ensaio foi conduzido de acordo com a norma ASTM D 5868, onde as amostras foram posicionadas nas garras da máquina de ensaio universal e tracionadas a 1,5 mm / min (0,05 in / min) até a falha ocorrer. Em cada condição adotada no estudo estatístico, três amostras soldadas foram ensaiadas. O cálculo da tensão é apresentado pela equação (1).

$$\tau = \frac{F_{max}}{L * b} \quad (1)$$

Onde:  $\tau$  é a tensão máxima de cisalhamento,  $F_{max}$  é a força máxima, L é comprimento da área soldada e b a largura da área soldada. A Figura 24 ilustra o ensaio de LSS realizado. Com a utilização dos resultados provenientes deste ensaio, foram realizadas soldagens em 39 amostras (para ambos os processos de soldagem) de compósito PEI/fibra de vidro e liga AA2024-T3, de acordo com o planejamento experimental realizado. Para não ocasionar tensões adicionais que pudessem afetar o resultado da tensão máxima de cisalhamento obtidas neste ensaio, *tabs* foram utilizados nas extremidades dos corpos de prova para manter a uniformidade das amostras soldadas durante o ensaio.

Figura 24 – Ilustração do ensaio de LSS para as amostras soldadas.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.5.1.2 Ensaio de ILSS (cisalhamento interlaminar)

A delaminação é uma preocupação importante no contexto do comportamento estrutural de materiais compósitos. Sabe-se que a delaminação pode diminuir a rigidez e a resistência do material, promovendo a falha estrutural (OSTACHOWICZ et al., 2017; SHOKRIEH; SALAMAT-TALAB; HEIDARI-RARANI, 2014; WANG et al., 2009).

Segundo ABRAHAO (2015), compósitos estruturais são materiais formados por um arranjo de camadas, sendo que na interface entre estas existe, normalmente, uma região muito fina de matriz polimérica que age como um elemento de ligação entre duas camadas adjacentes.

Desta forma, o ensaio de ILSS foi realizado neste trabalho com o intuito de avaliar o cisalhamento interlaminar e comparar esta propriedade com o cisalhamento na região entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3. Os ensaios foram realizados com uma célula de carga de 10 kN em uma máquina universal de ensaios mecânicos da SHIMADZU, modelo AG-X, pertencente ao Departamento de Tecnologia e Materiais (DMT) da FEG/Unesp - campus de Guaratinguetá, de acordo com a norma ASTM D2344. A ferramenta usada para realizar o ensaio consiste em duas hastes (espaçadas uma da outra em 4 vezes do tamanho da espessura das amostras), nas quais as amostras são apoiadas pelas extremidades. Foram submetidas cinco amostras nas condições já otimizadas pelo planejamento experimental com especificações de dimensões de acordo com a norma: espessura:  $t$ ; comprimento:  $6 * t$ ; largura:  $2 * t$ . O cálculo da força de cisalhamento é apresentado pela equação (2).

$$\tau_c = 0,75 * \frac{F_{max}}{b * t} \quad (2)$$

Onde:  $\tau_c$  é a tensão de cisalhamento,  $F_{max}$  é a força máxima,  $b$  a largura da amostra e  $t$  é a espessura da amostra.

### 3.5.2 Análise óptica

#### 3.5.2.1 Macroscopia

Após a soldagem entre os materiais de estudo e também aos ensaios mecânicos, as amostras selecionadas para microscopia devem passar antes pelo estereoscópio para uma breve análise da região soldada ou fraturada onde os principais pontos de estudo podem ser definidos. Para a realização desse trabalho, foi utilizado um estereoscópio da marca ZEISS, modelo STEMI 2000 com ampliação de até 50x, tendo as imagens processadas pelo software *Image J*, pertencente ao Departamento de Tecnologia e Materiais (DMT) da FEG/Unesp - campus de Guaratinguetá. A Figura 25 apresenta o estereoscópio utilizado no estudo.

Figura 25 - Estereoscópio da marca ZEISS utilizado no estudo.



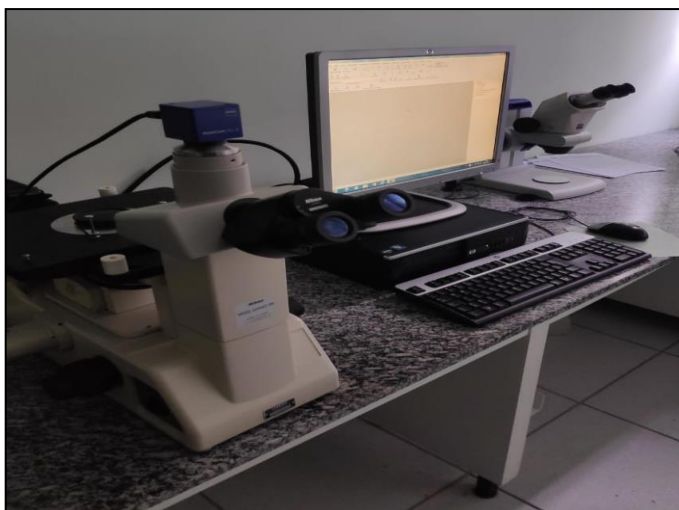
Fonte: Produção do próprio autor.

#### 3.5.2.2 Microscopia

Para a caracterização da região soldada entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3, a região da soldagem foi analisada com o intuito de avaliar a eficiência dos processos de soldagem realizados. As amostras, após a realização dos ensaios mecânicos,

também foram avaliadas. Para realização da microscopia as amostras foram cortadas na região da junta soldada e fraturada, embutidas a frio em resina acrílica A1, da empresa AROTEC, na proporção de 2 volumes de resina por 1 volume de catalisador e curadas por 60 minutos. Em ambos os casos, as amostras soldadas foram analisadas por microscopia óptica utilizando um Microscópio Lupa Zeiss/Stemi 2000 em luz polarizada, como apresentado na Figura 26, com ampliações de 5x, 10x, 15x, 20x e 50x. A superfície das amostras foi lixada com lixas de granulometria: 220, 320, 600 e 1200. Em seguida, foram polidas com um disco e pasta de diamante de 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ . As amostras da liga AA2024-T3 foram atacadas com o reagente *Keller* (1 mL de ácido fluorídrico 40%; 1,5 mL ácido clorídrico 35%; 2,5 mL de ácido nítrico 68% e 95 mL de água destilada) para revelar sua microestrutura.

Figura 26 - Microscópio Lupa Zeiss/Stemi 2000.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.5.3 Termogravimetria (TGA)

Para a avaliação da temperatura de degradação da matriz polimérica PEI e determinar se ocorrerá a influência da chama na soldagem por OFW e da radiação gerada pelo laser em sua temperatura de degradação, foi realizada a análise termogravimétrica (TGA) em um analisador modelo TG-DTA 6200 da marca SII- *Nanotechnology* (Figura 27), pertencente ao Departamento de Tecnologia e Materiais (DMT) da FEG/Unesp - campus de Guaratinguetá, utilizando um método dinâmico com aquecimento de 35°C até 1000°C, taxa de aquecimento

de 10°C/min e uma atmosfera de ar sintético (fluxo de 100 mL/min). A massa das amostras analisadas foram de 15 - 20 mg.

Figura 27 - Equipamento termogravimétrico SII Exstar 6000.



Fonte: Produção do próprio autor.

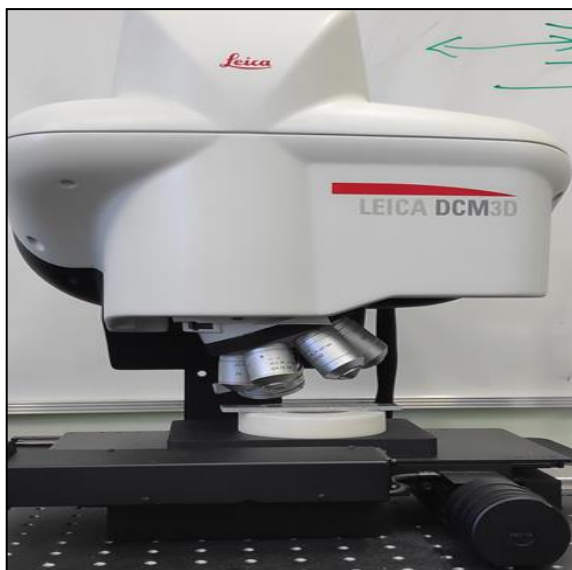
#### 3.5.4 Ensaio de rugosidade

O ensaio de rugosidade foi realizado nas amostras da liga AA2024-T3 com o objetivo de se determinar os valores de Ra (altura média aritmética) e Rz (altura máxima de perfil de rugosidade). A altura média aritmética (Ra) é o parâmetro de rugosidade mais usado universalmente para controle de qualidade de uso geral. Esta é definida como o desvio médio absoluto das irregularidades da rugosidade da linha média sobre um comprimento de amostragem.

O parâmetro Rz é mais sensível a altos picos ocasionais ou vales profundos do que o Ra. O sistema internacional ISO define esse parâmetro como a diferença de altura entre a média dos cinco picos mais altos e os cinco vales mais baixos ao longo do comprimento de avaliação do perfil. O sistema DIN alemão define Rz como a média da soma dos cinco picos mais altos e dos cinco vales mais baixos ao longo do comprimento de avaliação do perfil (VILLARROEL, 2012).

O ensaio de rugosidade foi realizado a partir de topografias de superfície em amostras da liga AA2024-T3 com a utilização do microscópio confocal LEICA DCM 3D (Figura 28), que combina tecnologia confocal e interferometria para medições em alta velocidade e alta resolução de até 0,1nm.

Figura 28 - Microscópio confocal interferométrico Leica DCM 3D.



Fonte: Produção do próprio autor.

A partir desta técnica, foram analisados dois estados das amostras da liga AA2024-T3; primeiro com a liga como recebida e após a liga ser anodizada. A partir disso, pôde-se analisar se há a influência da anodização na rugosidade da liga AA2024-T3 para uma melhor efetividade na união com o laminado polimérico. Desta forma, foram realizadas as topografias em cinco pontos diferentes nas amostras da liga AA2024-T3 em cada condição. As topografias obtidas foram analisadas com a utilização do software *Gwyddion* que é um programa livre e de código aberto para visualização e análise de parâmetros de rugosidades.

### 3.5.5 Microdureza

Para a análise da microdureza na liga AA2024-T3, visando analisar a possibilidade da influência da chama em sua propriedade de dureza, foram realizados os ensaios das amostras antes e após a exposição à chama pelo processo de soldagem por OFW. Esta análise foi realizada com a utilização do equipamento de medição de microdureza Vickers (Wolpert 121., Ludwigshafen, Alemanha) (Figura 29). O penetrador utilizado foi uma pirâmide de diamante de base quadrada que possui um ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas, com uma carga aplicada 300 gramas.

Figura 29 – Equipamento Wolpert 121 utilizado para determinação da dureza Vickers.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.5.6 Ensaio de corrosão pelo método Potenciodinâmico

Todo material quando em serviço é exposto as condições ambientes, podendo estas causarem danos e diminuição de sua vida útil. Um dos fatores que mais afeta e causa prejuízo é a corrosão, portanto torna-se necessário o emprego de técnicas em que se possa prever o comportamento do material em determinado meio. Por meio do ensaio de polarização potenciodinâmica é possível a obtenção de diversas informações com relação a corrosão de um material. Essa técnica indica a resistência à oxidação que um material tem quando exposto a um determinado eletrólito com aplicação de um potencial externo.

#### 3.5.6.1 Curva Tafel

Segundo De Oliveira e Bertazzoli (2011), os ensaios eletroquímicos permitem determinar, de forma rápida, a taxa de corrosão por meio da técnica de polarização ou varredura linear de potencial. Essas técnicas permitem submeter a interface da solução a valores crescentes de sobrepotencial para a aquisição de curvas de densidade de corrente ( $I$ ) x potencial ( $E$ ) em condições de equilíbrio estacionário (DE OLIVEIRA; BERTAZZOLI, 2011; NIE et al., 2013). As curvas de polarização, após obtidas, são usadas na determinação da corrente e do potencial de corrosão mediante o uso de curvas Tafel.

Segundo Rojas (2015), a técnica de extrapolação de Tafel baseia-se na teoria de potencial misto, a qual afirma que a reação anódica (Oxidação) e catódica (Redução) são realizadas simultaneamente, de modo que a densidade de corrente total é igual à diferença das densidades de corrente das reações, podendo ser expresso com a seguinte equação (3);

$$i = i_c - i_a \quad (3)$$

Onde,  $i$  é a densidade total de corrente,  $i_a$  é a densidade de corrente anódica e  $i_c$  é a densidade de corrente catódica. Esta técnica pode ser utilizada para medir a densidade corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ) de modo que seja possível o cálculo da velocidade de corrosão. Uma curva de tafel pode proporcionar diretamente a ( $i_{corr}$ ) ou a inclinação de Tafel ( $ba$  e  $bc$ ) (Rojas, 2015). As equações 4, 5 e 6 apresentam a relação entre o valor de  $R_p$ , as inclinações de Tafel e a taxa de corrosão.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} e = e_{corr} \quad (4)$$

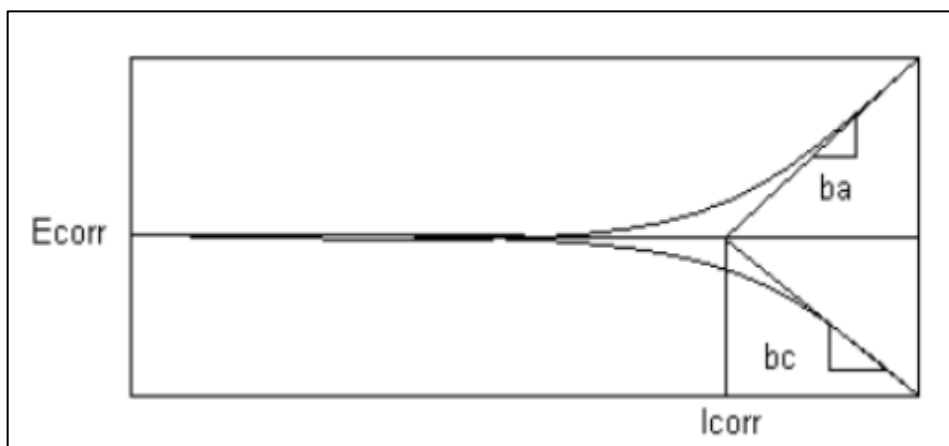
$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (5)$$

$$B = \frac{babc}{2.303(ba + bc)} \quad (6)$$

Onde:  $R_p$  é  $\Delta E/\Delta i$  e a inclinação da região linear,  $\Delta E$  diferença de potenciais em volts (V),  $\Delta i$  se expressa em microampères ( $\mu A$ ),  $ba$  é a inclinação de Tafel anódica (mV),  $bc$  é a inclinação de Tafel catódica (mV),  $i_{corr}$  é a densidade de corrente ( $A/cm^2$ ) e  $B$  é a constante de Tafel. Com isso, pode-se gerar uma curva de polarização ao iniciar a varredura a partir do  $E_{corr}$

(potencial). Como resultado, a curva resultante é um gráfico do potencial aplicado versus o logaritmo da corrente medida, como apresentado pela Figura 30.

Figura 30 - Inclinações da curva Tafel.



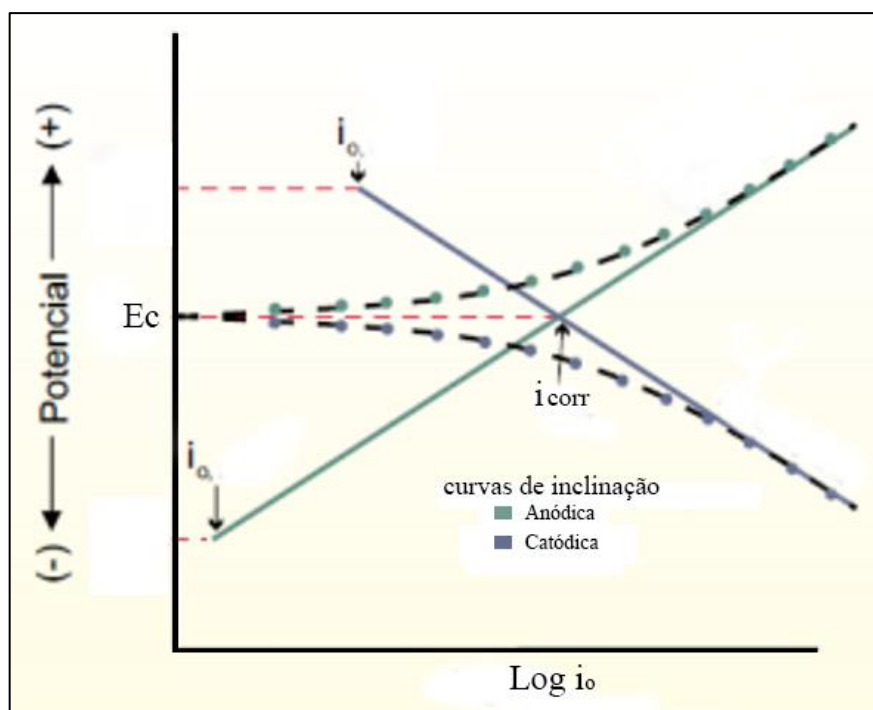
Fonte: WOLYNEC (2003).

Segundo Rojas (2015), uma maneira de determinar  $i_{corr}$  é traçando uma linha reta ao longo da porção linear da curva anódica ou catódica até interceptar o eixo Y ( $E_{corr}$ ). Sob condições ideais, a curva de Tafel deve ser linear em algum intervalo de potenciais aproximados. A inclinação da linha reta que se ajusta aos dados é chamada inclinação de Tafel (B). Pode-se determinar uma inclinação de Tafel anódica (ba) de um ajuste da região linear anódica e uma inclinação de Tafel catódica (bc) de um ajuste da região linear catódica, podendo ser observado na Figura 31.

### 3.5.6.2 Análise potenciodinâmica

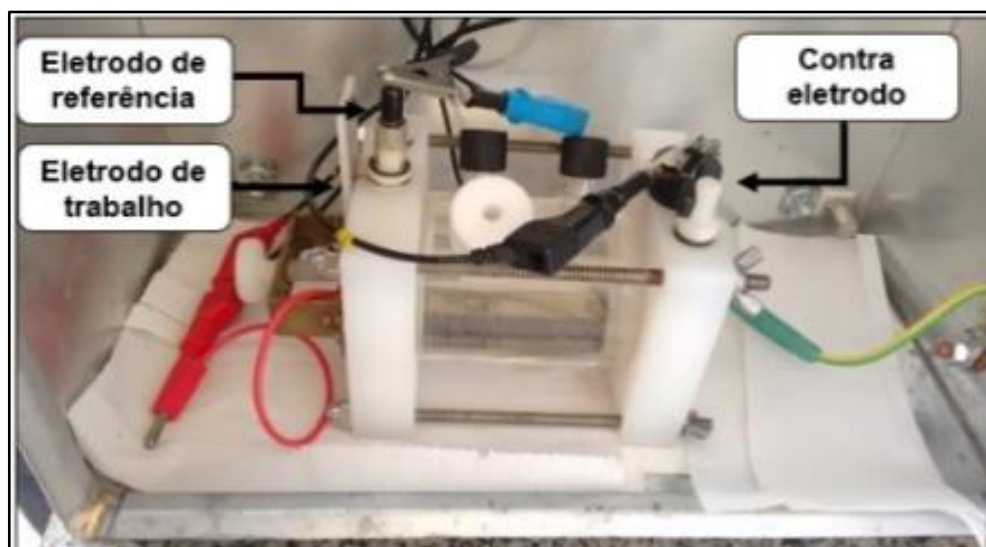
As amostras da liga de alumínio anodizadas e também as amostras soldadas e ensaiadas mecanicamente foram colocadas em uma célula eletroquímica de três eletrodos. Uma célula para amostra plana foi utilizada nos ensaios de corrosão (Figura 32). Na obtenção das curvas de polarização potenciodinâmicas (CP), as amostras da liga AA2024-T3 anodizada, antes e após a sodagem, foram usadas como eletrodo de trabalho e imersa em solução de NaCl 3,5% aerada, com um eletrodo de referência de Ag/AgCl (KCl saturado) e um contra eletrodo de platina. As curvas de polarização foram obtidas a uma velocidade de 0,33mV/s e no intervalo de potenciais de 0,30 V abaixo e acima do potencial de circuito aberto para o material no eletrólito. Para a análise da curva Tafel foi utilizado o *software nova 2.1.4*.

Figura 31 - Inclinação de Tafel para obtenção da densidade de corrente.



Fonte: Adaptado de HUAYHUA (2014).

Figura 32 - Célula eletroquímica utilizada.



Fonte: Produção do próprio autor.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste Capítulo são apresentados os principais resultados provenientes deste estudo, com as respectivas discussões.

### **4.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM**

#### **4.1.1 Processo de soldagem por OFW**

Para a obtenção dos melhores resultados envolvendo a união de materiais distintos é importante que os parâmetros do processo estejam bem definidos para que ocorra uma soldagem efetiva, e para que os parâmetros possam ser otimizados. Para a soldagem por OFW foram determinados os parâmetros a partir de testes preliminares, em que se observou a efetiva união dos materiais sem uma grande presença de degradação na junta soldada.

Para início da análise de eficácia do processo de soldagem por OFW foram determinados, utilizando um planejamento experimental como ferramenta, dois parâmetros: tempo de aplicação da chama (s) e a distância da tocha utilizada (mm). Com os parâmetros determinados, foram realizadas as soldagens preliminares com os valores mínimo e máximo encontrados, conforme apresentado na Tabela 11.

Neste estudo, o critério adotado para a obtenção dos valores mínimo e máximo de distância e tempos foi a observação visual, ou seja, se houve uma efetiva soldagem sem degradação aparente da matriz polimérica na união do compósito PEI/fibra de vidro com a liga AA2024-T3. Em todos os ensaios realizados, para um melhor contato entre os dois materiais visando a efetiva formação da união, a liga AA2024-T3 foi lixada com uma lixa de granulometria de 80 mesh.

De acordo com a literatura, a temperatura de transição vítrea do PEI é de, aproximadamente, 220°C, sendo sua temperatura de início de degradação térmica de, aproximadamente, 430 °C (KUMAR et al., 2007, CACCIOTTI et al., 2018). Analisando-se a variável tempo, foi observado com as tentativas iniciais que tempos de soldagem abaixo de 90 segundos não foram suficientes para que a temperatura pudesse ultrapassar a temperatura de transição vítrea da matriz polimérica, não ocorrendo, assim, a efetiva união dos materiais (temperaturas próximas a 180°C). Por outro lado, para tempos acima de 120 segundos, a temperatura ultrapassou 400°C, degradando a matriz polimérica.

Tabela 11 - Resultados preliminares para determinação dos valores máximo e mínimo da soldagem OFW.

| Ensaio | Distância (mm) | Tempo (s) | Temperatura Máxima Atingida (°C) | Situação após soldagem         |
|--------|----------------|-----------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1      | 20             | 30        | 185                              | Não soldou                     |
| 2      | 20             | 40        | 180                              | Não soldou                     |
| 3      | 20             | 60        | 395                              | Não soldou, degradou           |
| 4      | 30             | 30        | 180                              | Não soldou                     |
| 5      | 30             | 60        | 270                              | Parcialmente soldado           |
| 6      | 30             | 90        | 290                              | Soldou, pouca degradação       |
| 7      | 30             | 120       | 280                              | Soldou, presença de degradação |
| 8      | 30             | 140       | 405                              | Não soldou, degradou           |
| 9      | 35             | 30        | 185                              | Não soldou                     |
| 10     | 35             | 60        | 210                              | Não soldou                     |
| 11     | 35             | 120       | 250                              | Soldou, pouca degradação       |
| 12     | 35             | 140       | 410                              | Não soldou, degradou           |
| 13     | 40             | 60        | 240                              | Parcialmente soldado           |
| 14     | 40             | 105       | 235                              | Soldou, pouca degradação       |
| 15     | 40             | 120       | 230                              | Soldou, pouca degradação       |

Fonte: Produção do próprio autor.

Em relação à distância da tocha até a amostra, valores abaixo de 30 mm, apresentaram uma degradação quase total do compósito polimérico na região de união. Já com a utilização de uma distância acima de 40 mm não houve tempo suficiente para a união dos materiais em estudo, inviabilizando a realização da soldagem com o tempo já pré-determinado.

Desta forma, com base neste estudo inicial, a distância e o tempo mínimos a qual ocorreu a efetivação da solda e obtenção das juntas entre o laminado e a liga de alumínio, foram de 30 mm e 90 segundos, respectivamente. Já a distância e o tempo máximo determinados foram de 40 mm e 120 segundos, respectivamente.

Após a obtenção dos resultados provenientes das soldas preliminares, as amostras que se apresentaram visualmente soldadas, como apresentado a partir da Tabela 11, foram submetidas ao ensaio LSS, para comprovação dos valores mínimo a máximo atribuídos e, deste modo,

serem aplicados ao planejamento estatístico. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos a partir do ensaio LSS para esta avaliação.

Tabela 12 – Resultados preliminares de LSS das amostras soldadas por OFW entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3.

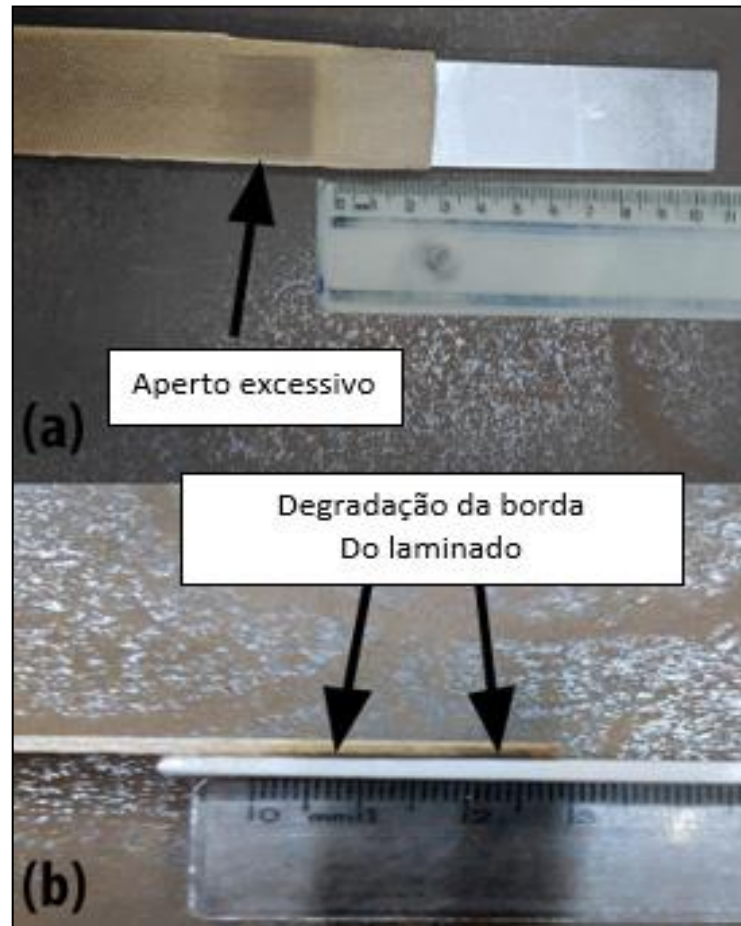
| <b>Ensaio</b> | <b>Situação após soldagem</b>  | <b>Distância (mm)</b> | <b>Tempo (s)</b> | <b>LSS (MPa)</b> |
|---------------|--------------------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| 1             | Parcialmente soldado           | 30                    | 60               | 1,97             |
| 2             | Parcialmente soldado           | 40                    | 60               | -                |
| 3             | Soldou, presença de degradação | 30                    | 120              | 3,90             |
| 4             | Soldou, pouca degradação       | 30                    | 90               | 4,02             |
| 5             | Soldou, pouca degradação       | 35                    | 120              | 4,96             |
| 6             | Soldou, pouca degradação       | 40                    | 105              | 2,02             |
| 7             | Soldou, pouca degradação       | 40                    | 120              | 3,10             |

Fonte: Produção do próprio autor.

Os dispositivos utilizados nesse trabalho para a soldagem por OFW foram desenvolvidos visando a efetiva união entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3, com uma qualidade de juntas que não apresentasse a degradação do material termoplástico e que obtivesse resultados satisfatórios de valores de resistência mecânica. Como o dispositivo utilizado, inicialmente sendo formado por placas de aço, apresentou defeitos relacionados a pressão e a proteção do laminado durante a soldagem, como já descrito no item 3.2.1.1, este precisou ser reestruturado a partir do conhecimento dos resultados preliminares desta pesquisa. Os principais defeitos gerados nas amostras soldadas a partir deste primeiro dispositivo podem ser visualizados nas Figuras 33 (a) (que apresenta o caso de aperto excessivo da amostra soldada) e a Figura 33 (b) (que detalha a degradação da borda proveniente da não proteção do dispositivo a chama).

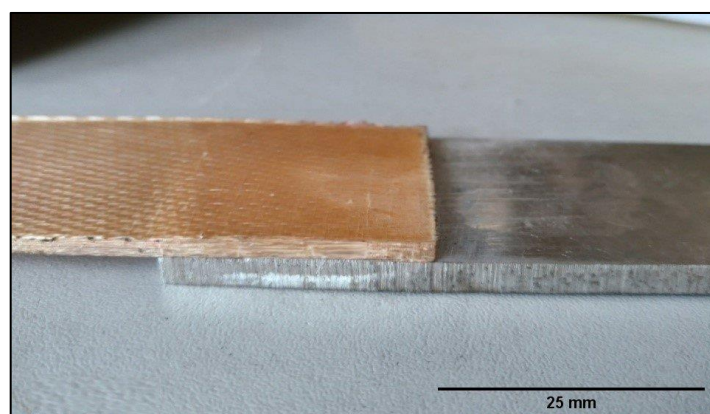
Para eliminar os defeitos citados anteriormente e obter uma melhor qualidade das juntas foi desenvolvido um dispositivo constituído de tijolo refratário. Como consequência dos reparos, uniões de boa qualidade foram realizadas, sem a presença visual de degradações ao longo das bordas e superfície da amostra de compósito polimérico, sendo esse resultado apresentado pela Figura 34.

Figura 33 – Corpos de prova obtidos a partir da soldagem OFW - (a) uma excessiva pressão sobre a junta soldada causando um escoamento lateral do laminado PEI; (b) presença de degradação nas bordas da junção do laminado PEI e a liga AA2024-T3.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 34 - Junta soldada do compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 soldado pelo dispositivo refratário.



Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.1.2 Soldagem a Laser Yb :Fibra

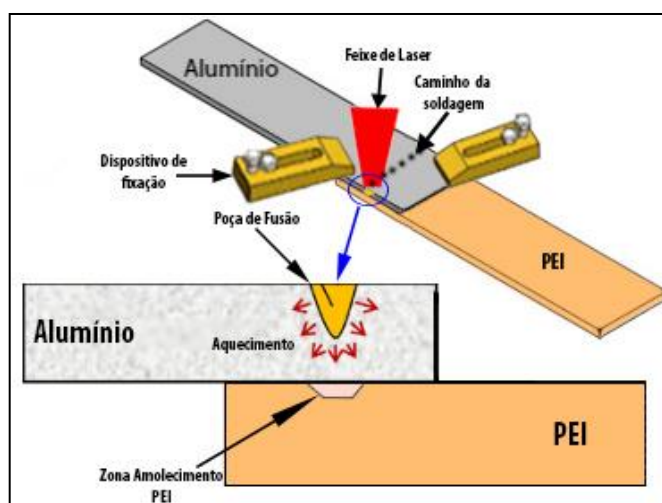
Assim como foi realizado para a soldagem por OFW, para a soldagem a laser foram determinados os parâmetros a partir de testes preliminares, onde foi constatado a efetiva união dos materiais envolvidos sem a presença de degradação na junta soldada, a partir de uma análise visual da região soldada e dos resultados provenientes do ensaio de LSS realizado.

Como descrito no item 3.2.2, o método de soldagem a laser consiste na aplicação direta do laser na superfície da liga AA2024-T3. A energia do laser é absorvida quando o raio irradia na superfície da liga de alumínio e, então, o calor gerado é transferido para a interface entre a liga AA2024-T3 e o compósito PEI/Fibra de vidro, ocorrendo a formação de uma zona de amolecimento da matriz polimérica PEI e os unindo a partir do intertravamento mecânico na interface entre estes constituintes (Figura 35).

Como observado a partir da Figura 35, as amostras a serem soldadas são presas pelo dispositivo de fixação, pertencente a bancada do processo a laser Yb: fibra, onde se mantém o contato direto entre a liga de alumínio e o laminado durante toda a soldagem.

Como descrito anteriormente, os parâmetros para a soldagem a laser Yb: fibra também foram determinados utilizando como ferramenta o planejamento experimental. Nas soldagens preliminares, foram utilizados como parâmetros: potência do laser (W), velocidade de aplicação do laser (mm/s), desfocalização do feixe (mm), fluxo de gás (l/min) e a direção do cordão. A Tabela 13 apresenta os resultados preliminares obtidos neste trabalho.

Figura 35 - Diagrama esquemático da união do laminado PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 por condução térmica.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 13 - Parâmetros utilizados no processo a laser por Yb: fibra.

| Parâmetros utilizados |              |                          |                     |                      |                                         |                              |
|-----------------------|--------------|--------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| Testes                | Potência (W) | Velocidade (mm/s)        | Desfocalização (mm) | Fluxo de gás (l/min) | Intensidade Laser (MW/cm <sup>2</sup> ) | Direção do cordão            |
| 1                     | 1000         | 2,5<br>5,0<br>10,0       | 14                  | 10                   | 25,5                                    | Transversal                  |
| 2                     | 1200         | 1,0<br>2,5<br>5,0        | 10<br>20<br>14      | 10                   | 30,6                                    | Transversal                  |
| 3                     | 1250         | 1,0<br>2,5<br>5,0        | 14                  | 10                   | 31,8                                    | Transversal/<br>Longitudinal |
| 4                     | 1300         | 1,0<br>2,0<br>2,5<br>5,0 | 14                  | 10                   | 33,1                                    | Transversal/<br>Longitudinal |
| 5                     | 1350         | 1,0<br>1,5<br>2,0        | 14                  | Sem gás<br>10        | 34,4                                    | Transversal                  |
| 6                     | 1400         | 1,0<br>1,3<br>1,5<br>2,0 | 14                  | 10                   | 35,6                                    | Transversal                  |
| 7                     | 1500         | 2,5<br>5,0               | 10<br>20<br>14      | 10                   | 38,3                                    | Transversal                  |

Fonte: Produção do próprio autor.

Primeiramente, o tempo de aplicação do laser foi fixado em 5 segundos. Em cada teste, foi se alternando a potência, mudando a velocidade em três condições: a desfocalização, fluxo de gás e a direção do cordão. Desta forma, foi observado que no caso destas condições aplicadas na soldagem, a desfocalização diferente de 14 mm não é apropriada para garantir a soldagem das amostras. Além disso, a utilização do gás de proteção (argônio) foi fundamental na união efetiva dos materiais, onde foi observado a degradação das amostras em condições que não se utilizava o gás. Por fim, a utilização do laser no sentido transversal garantiu uma melhor qualidade de junta soldada, sendo que as amostras soldadas longitudinalmente foram muitas vezes obtidas parcialmente ou nem ao menos soldadas.

A partir dos resultados provenientes dos testes preliminares apresentados na Tabela 13, foi possível obter uma janela de parâmetros para se determinar os valores mínimo e o máximo do processo de soldagem a laser Yb: fibra. Adicionalmente, para determinação destes parâmetros iniciais, todas as amostras de AA2024-T3 foram previamente preparadas, com lixas de granulometria de 80 mesh, visando a remoção de óxidos que pudessem interferir no processo de soldagem. Observou-se que em velocidades acima de 1,5 mm/s não ocorreu a união efetiva dos materiais. Potências acima de 1400 W causam a degradação da liga AA2024-T3 e abaixo de 1250 W produzem uniões parcialmente soldadas, sendo rompidas logo após o ensaio. Os valores de potência e de velocidade mínima do processo determinados foram de 1300 W e 1,1 mm/s, respectivamente. Os valores máximos determinados para a potência e velocidade foram de 1350 W e 1,3 mm/s, respectivamente.

O tempo de aplicação do laser, com velocidade muito baixa, foi observado que, de certa forma, pode influenciar a formação da junta soldada. Para tempo de aplicação do laser maiores que cinco segundos podem causar uma penetração excessiva de *keyhole*, devido ao acúmulo de calor e, consequentemente, sem uma aplicação correta dos parâmetros, ocorre a formação de trincas e porosidade com juntas de má qualidade. Na Figura 36, é destacada a formação de um orifício, típico do regime *keyhole*, devido a vaporização do alumínio. Além disso, em tempos de aplicação menores que cinco segundos, não há formação da junção, devido à baixa transferência de calor pelo feixe.

O objetivo dessa etapa do estudo foi realizar uma junção entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3 pelo processo a laser por condução térmica, assim como foi realizado pela soldagem por OFW e, consequentemente, comparar os resultados obtidos em ambos os processos. Segundo Coelho, Lima e Costa (2013), a soldagem a laser por condução térmica ocorre quando se utiliza baixa potência, alta velocidade ou feixe desfocado, o que implica em

densidade de potência insuficiente para causar evaporação. No presente trabalho foi aplicado uma desfocalização de 40 mm.

Figura 36 - Formação de *keyhole* com um tempo de aplicação de seis segundos.



Fonte: Produção do próprio autor.

O método por *keyhole*, segundo Oladimeji e Taban (2016), envolve a focalização do feixe de laser, com a formação de uma pequena cavidade e à medida que o feixe de laser incide sobre o material, a temperatura aumenta e a fusão ocorre quase instantaneamente. Como mencionado por Ahn et al. (2018), a formação de *keyhole* ocorre onde as intensidades de energias são maiores que  $10^6 \text{ W/cm}^2$ . Entretanto, Pramanik et al. (2017) relata que a formação de *keyhole* possui diversas desvantagens como a alta porosidade, trincas e defeitos de soldagem, o que o torna inadequado para a soldagem de metais altamente refletivos, como o alumínio.

Com a aplicação do laser em cinco segundos, foi obtido um resultado satisfatório na obtenção de uma junta soldada a partir da condução térmica. A Tabela 14 apresenta os resultados preliminares de LSS obtidos com a determinação dos parâmetros. Três amostras em cada condição foram ensaiadas.

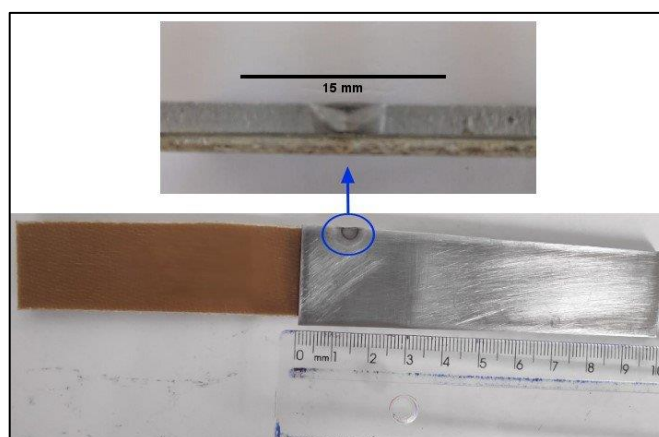
A partir da soldagem preliminar foram obtidas uniões de dois métodos diferentes de laser (*keyhole* e condução térmica). A união que obteve o maior valor de LSS, apresentado pela Tabela 14 (5,37 MPa), foi obtida por condução térmica, como apresentado na Figura 37. Observa-se que na extremidade da borda da liga AA2024-T3 ficou próxima da ocorrência da *keyhole* (destacado na Figura 37), entretanto, não foi observado a formação de um orifício na região citada, característica da formação da *keyhole*.

Tabela 14 – Resultados preliminares de LSS da junção compósito/alumínio soldados a laser.

| Condição | Potência (W) | Velocidade (mm/s) | Tempo de Aplicação do Laser (s) | LSS (MPa) |
|----------|--------------|-------------------|---------------------------------|-----------|
| 1        | 1300         | 1,0               | 5                               | 2,12      |
| 2        | 1300         | 1,5               | 6                               | 1,53      |
| 3        | 1300         | 1,3               | 5                               | 4,80      |
| 4        | 1350         | 1,2               | 5                               | 2,10      |
| 5        | 1350         | 1,0               | 5                               | 5,37      |

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 37 - Junta soldada pelo processo a laser por condução térmica sem a formação de um orifício.



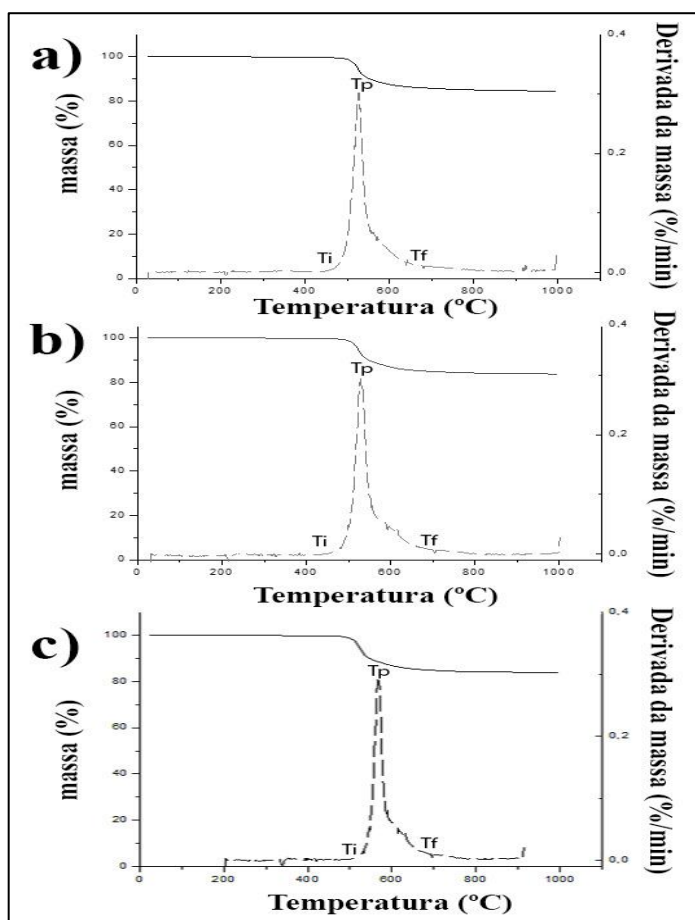
Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.1.3 Termogravimetria (TGA)

Neste trabalho foram realizadas análises termogravimétricas (TGA) para conhecimento da temperatura de decomposição térmica da matriz polimérica do compósito PEI/fibra de vidro como recebido. Além disso, curvas de TGA também foram realizadas para identificar se houve qualquer alteração na temperatura de decomposição da matriz do compósito PEI/fibra de vidro após o processo de soldagem OFW e da soldagem a laser Yb: fibra. A determinação da janela do processo de soldagem, ou seja, das temperaturas mínima e máxima às quais a matriz polimérica deve suportar, é uma condição essencial para as peças formarem juntas eficientes e um para a obtenção de valor máximo da resistência de junção. Essa temperatura deve estar acima da temperatura de transição vítrea (para o polímero PEI amorfo), mas não deve exceder

a temperatura de decomposição térmica do polímero, para evitar a ocorrência da degradação do material. A Figura 38 (a) apresenta o resultado da curva TGA para o compósito PEI/fibra de vidro como recebido; a Figura 38 (b) apresenta o resultado da curva TGA para o compósito PEI/fibra de vidro após a união com a liga AA2024-T3 pelo processo de soldagem OFW. Já a Figura 38 (c), apresenta o resultado da curva TGA para a soldagem a laser por Yb: fibra.

Figura 38 - Resultados de TGA/DTG para os compósitos PEI/fibra de vidro: (a) como recebido; (b) após a soldagem por OFW; (c) após a soldagem a laser Yb: fibra.



Fonte: Produção do próprio autor.

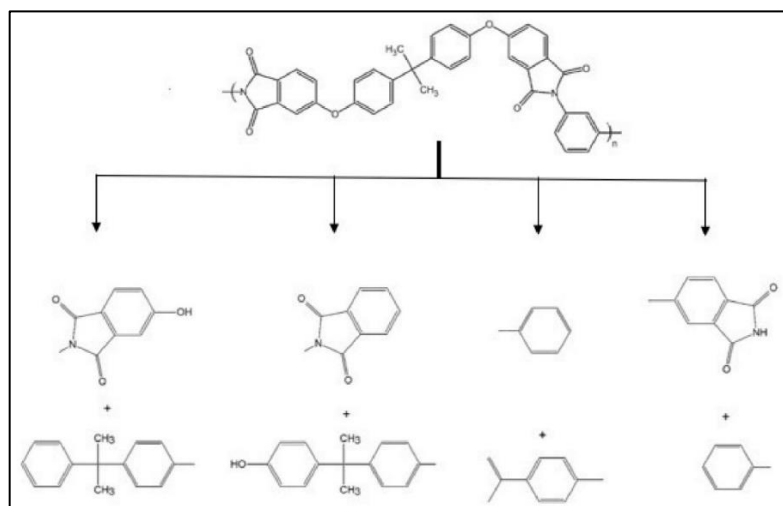
Como pode ser observado na Figura 38 (a), (b) e (c), o processo de decomposição térmica da matriz de PEI, em todos os compósitos, ocorre em uma única etapa de decomposição confirmado pela presença de apenas um pico na DTG (tal pico apresenta um ombro do lado direito indicando a possível existência de mecanismos de decomposição sobrepostos). A temperatura inicial de decomposição térmica observada é de 470°C para o compósito como recebido; de 440 °C para o compósito após a soldagem por OFW e de 520°C após a soldagem a laser Yb: fibra. Além disso, a temperatura final de decomposição observada foi de 678°C para

o compósito como recebido, 693°C para o compósito após a soldagem por OFW e 690°C após a soldagem a laser Yb: fibra.

Além disso, pode-se observar pela DTG que em todas as condições do compósito PEI/fibra de vidro a reação de composição térmica ocorre em uma faixa estreita de temperatura, sendo que a  $T_p$ , corresponde a temperatura máxima na qual há maior velocidade de perda de massa, e a mesma ocorre em aproximadamente 533°C, 523°C e 580°C para o compósito como recebido; para o compósito após a soldagem por OFW e para o compósito após a soldagem a laser Yb: fibra, respectivamente.

No que diz respeito às reações de degradação térmica, alguns autores (AMANCIO-FILHO et al., 2008) consideram que tal mecanismo da matriz polimérica de PEI ocorre conforme ilustrado na Figura 38. Na Figura 39, está representada a cisão seguida pelas reações de transferência de hidrogênio C – H nas ligações éter, contendo unidades ftalimida com o fenil anéis modificados por H / OH e /ou bisfenol A. Além disso, pode ser observada a formação de compostos contendo anéis ftalimida com ligações éter, hidrogênio, metil, etil, isopropilideno e grupos terminais isopropil (H, CH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>). Podem, ainda, ser observadas reações que levam à formação de diferentes compostos como álcoois, acetonas e ácidos.

Figura 39 - Mecanismos de decomposição térmica da cisão da cadeia polimérica de PEI.



Fonte: Amancio-Filho et al. (2008).

A partir desses resultados, nota-se que não há alteração significativa na temperatura de decomposição do material termoplástico antes e após a soldagem por OFW e a laser, confirmando a eficácia dos processos de soldagem para a junção entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 a partir da condução térmica, não afetando a características térmicas do laminado.

#### 4.1.4 Aplicação do Planejamento Experimental

Para se determinar, de forma mais eficiente e precisa, os parâmetros de soldagem, neste trabalho optou-se pela realização de um planejamento experimental. Desta forma, os parâmetros de soldagem OFW e a soldagem a laser utilizaram como variáveis independentes: tempo de aplicação da chama (s) e distância do maçarico a peça soldada (mm) para a soldagem OFW e potência do laser (W) e velocidade do feixe (mm/s) para a soldagem por laser, baseando-se nos ensaios preliminares anteriormente apresentados. Como variável de resposta para o estudo deste processo foi adotada a tensão de ruptura obtida a partir do ensaio LSS.

Segundo Albiero et al. (2012), categoria de projetos fatoriais  $2^k$  é particularmente útil em estágios iniciais onde existem muitos fatores a serem investigados. Como apresentado a partir do item 3.3, o planejamento experimental denominado *Central Composite Design* (CCD) para  $k$  fatores = 2 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 (nesse trabalho, foram avaliadas cinco replicatas no ponto central), que 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 ( $2 \times 2 = 4$ ), portanto, tendo-se  $4 + 4 + 5 = 13$  experimentos para cada laminado e a liga AA2024-T3 estudado. Em cada experimento, três amostras foram soldadas com o objetivo de se determinar uma melhor média dos resultados de LSS, sendo no total de 39 amostras soldadas para a realização do dado estatístico, em ambos os processos.

Os resultados obtidos dos experimentos realizados com a união da liga AA2024-T3 e do compósito PEI/Fibra de vidro pelo processo de soldagem por OFW é apresentado pela Tabela 15. Já a Tabela 16 apresenta os resultados obtidos dos experimentos realizados a partir da soldagem por laser Yb: fibra. Os resultados foram avaliados utilizando-se o programa *Design-Expert 6.0* (Stat-Ease Corporation, USA).

Como observado pela Tabela 15, verifica-se que os valores de tensão de ruptura obtidos a partir do ensaio LSS encontram-se entre 0,42 a 6,91 MPa na união entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga de alumínio 2024-T3 pelo processo de OFW, sendo o maior valor obtido no *standard* 9 com um tempo de 105 segundos e distância em 35 mm. Já para a soldagem a laser (Tabela 16), os valores de tensão de ruptura obtidos a partir do ensaio de LSS encontram-se entre 5,22 a 8,06 MPa, sendo o maior valor obtido no *standard* 3 com uma velocidade de 1,10 mm/s e potência de 1350 W.

Tabela 15 - Resultados de *Lap Shear* correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para a união da liga AA2024-T3 e compósito PEI/fibra de vidro pelo processo OFW.

| Standard | Estudos das variáveis |                   |              |                   | Variável resposta         |
|----------|-----------------------|-------------------|--------------|-------------------|---------------------------|
|          | Codificadas           |                   | Reais        |                   | <i>Lap Shear</i><br>(MPa) |
|          | Tempo<br>(s)          | Distância<br>(mm) | Tempo<br>(s) | Distância<br>(mm) |                           |
| 1        | -1                    | -1                | 90,00        | 30,00             | 5,74                      |
| 2        | 1                     | -1                | 120,00       | 30,00             | 6,48                      |
| 3        | -1                    | 1                 | 90,00        | 40,00             | 5,74                      |
| 4        | 1                     | 1                 | 120,00       | 40,00             | 0,77                      |
| 5        | - $\alpha$            | 0                 | 83,79        | 35,00             | 3,65                      |
| 6        | A                     | 0                 | 126,21       | 35,00             | 0,42                      |
| 7        | 0                     | - $\alpha$        | 105,00       | 27,93             | 5,49                      |
| 8        | 0                     | A                 | 105,00       | 42,07             | 3,78                      |
| 9        | 0                     | 0                 | 105,00       | 35,00             | 6,91                      |
| 10       | 0                     | 0                 | 105,00       | 35,00             | 4,42                      |
| 11       | 0                     | 0                 | 105,00       | 35,00             | 6,12                      |
| 12       | 0                     | 0                 | 105,00       | 35,00             | 4,67                      |
| 13       | 0                     | 0                 | 105,00       | 35,00             | 6,24                      |

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 16 - Resultados de *Lap Shear* correspondentes aos experimentos conduzidos de acordo com o planejamento estatístico para a junção da liga AA2024-T3 e compósito PEI/fibra de vidro pelo processo a laser.

| Standard | Estudos das variáveis |                 |                      |                 | Variável resposta         |
|----------|-----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|---------------------------|
|          | Codificadas           |                 | Reais                |                 |                           |
|          | Velocidade<br>(mm/s)  | Potência<br>(W) | Velocidade<br>(mm/s) | Potência<br>(W) | <i>Lap Shear</i><br>(MPa) |
| 1        | -1                    | -1              | 1,10                 | 1300            | 6,61                      |
| 2        | -1                    | 1               | 1,30                 | 1300            | 6,89                      |
| 3        | 1                     | -1              | 1,10                 | 1350            | 8,06                      |
| 4        | 1                     | 1               | 1,30                 | 1350            | 7,34                      |
| 5        | 0                     | $-\alpha$       | 1,06                 | 1325            | 6,98                      |
| 6        | 0                     | $\alpha$        | 1,34                 | 1325            | 7,16                      |
| 7        | $-\alpha$             | 0               | 1,20                 | 1290            | 6,10                      |
| 8        | A                     | 0               | 1,20                 | 1360            | 7,73                      |
| 9        | 0                     | 0               | 1,20                 | 1325            | 5,99                      |
| 10       | 0                     | 0               | 1,20                 | 1325            | 5,91                      |
| 11       | 0                     | 0               | 1,20                 | 1325            | 6,00                      |
| 12       | 0                     | 0               | 1,20                 | 1325            | 6,42                      |
| 13       | 0                     | 0               | 1,20                 | 1325            | 5,22                      |

Fonte: Produção do próprio autor.

Desta forma, pode-se concluir que, embora tenham sido os mesmos materiais e processos que utilizam o conceito da condução térmica, a utilização de diferentes métodos de soldagem altera os efeitos e valores de tensão de ruptura que cada material suporta, provavelmente devido às diferenças de distribuição de calor na região de soldagem dos processos utilizados, onde a soldagem a laser Yb: fibra, na exposição da liga de alumínio ao laser, é mais concentrada do que na chama da soldagem OFW, havendo uma melhor distribuição do calor gerado para a interface da matriz polimérica PEI ocasionando, assim, um maior valor de LSS (8,06 MPa da soldagem a laser contra 6,91 MPa da soldagem OFW).

O resultado de ANOVA para os estudos dos efeitos das variáveis de tempo e distância para a soldagem OFW entre a liga AA2024-T3 e compósito PEI são apresentados na Tabela 17. Já a Tabela 18 apresenta o resultado de ANOVA para os estudos dos efeitos das variáveis de potência e velocidade para a soldagem a laser Yb: fibra.

Nas Tabelas 17 e 18, verificou-se que o valor do modelo F para a soldagem por OFW e a soldagem a laser, de 6,01 e 10,32, respectivamente, implica que os modelos adotados são significativos. Ainda, de acordo com o teste, há uma probabilidade de apenas 1,79% e 0,40%, respectivamente, de que esse valor de F desse tamanho ocorra devido a ruídos.

Tabela 17 - Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem por OFW da junção entre a liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro.

| <b>Fator</b>           | <b>Soma quadrática</b> | <b>Graus de liberdade</b> | <b>Valor de F</b> | <b><math>\alpha &gt; F</math></b> |
|------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Modelo                 | 41,36                  | 5                         | 6,01              | 0,0179*                           |
| Tempo                  | 9,68                   | 1                         | 7,03              | 0,0328*                           |
| Distancia              | 8,26                   | 1                         | 6,00              | 0,0441*                           |
| Tempo <sup>2</sup>     | 15,27                  | 1                         | 11,10             | 0,0126*                           |
| Distancia <sup>2</sup> | 0,23                   | 1                         | 0,17              | 0,6951                            |
| Tempo - Distancia      | 8,15                   | 1                         | 5,93              | 0,0451*                           |
| Erro residual          | 9,63                   | 7                         |                   |                                   |
| Falta de ajuste        | 5,00                   | 3                         | 1,44              | 0,3559                            |
| Erro puro              | 4,63                   | 4                         |                   |                                   |
| <b>R<sup>2</sup></b>   | <b>0,8112</b>          |                           |                   |                                   |

\*Valores significativos para  $F < 0,05$ .

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 18 - Análise de variância (ANOVA) para o modelo quadrático da soldagem a laser Yb: fibra da junção entre a liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro.

|                         |               |   |       |         |
|-------------------------|---------------|---|-------|---------|
| Modelo                  | 6,93          | 5 | 10,32 | 0,0040* |
| Velocidade              | 0,042         | 1 | 0,032 | 0,8630  |
| Potência                | 2,21          | 1 | 16,47 | 0,0048* |
| Velocidade <sup>2</sup> | 2,84          | 1 | 21,17 | 0,0025* |
| Potência <sup>2</sup>   | 2,19          | 1 | 16,35 | 0,0049* |
| Velocidade - Potência   | 0,25          | 1 | 1,86  | 0,2196  |
| Erro residual           | 0,94          | 7 |       |         |
| Falta de ajuste         | 0,19          | 3 | 0,34  | 0,8018  |
| Erro puro               | 0,75          | 4 |       |         |
| <b>R<sup>2</sup></b>    | <b>0,8805</b> |   |       |         |

\*Valores significativos para  $F < 0,05$ .

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir deste estudo, verificou-se que, na soldagem OFW entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3, as variáveis significativas foram o tempo, a distância, tempo quadrático e tempo-distância. Isto é constatado na Tabela 17, que mostra o teste de significância dos efeitos das variáveis independentes (tempo e distância) sobre a variável resposta a tensão de ruptura avaliada a partir do teste de LSS. Com esta análise verificou-se que a tensão de ruptura (variável resposta) das amostras soldadas foi dependente das variáveis independentes tempo e distância, variável tempo-distância, sendo que, o tempo foi também significativo considerando o efeito quadrático. Entretanto, apenas a distância quadrática não foi significativa para a variável resposta considerada.

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. Para a soldagem a laser Yb: fibra (Tabela 18), observou-se com a análise de variância que os fatores significativos do processo foram a variável independente potência, velocidade e potência considerando o modelo quadrático. Entretanto, a variável independente velocidade e a variável potência-velocidade não foram significativos para a variável resposta considerada. Este modelo também foi considerado significativo em nível de significância de 95% e o valor de  $R^2$  obtido indica que mais de 88,05% da variabilidade experimental podem ser explicadas por este modelo.

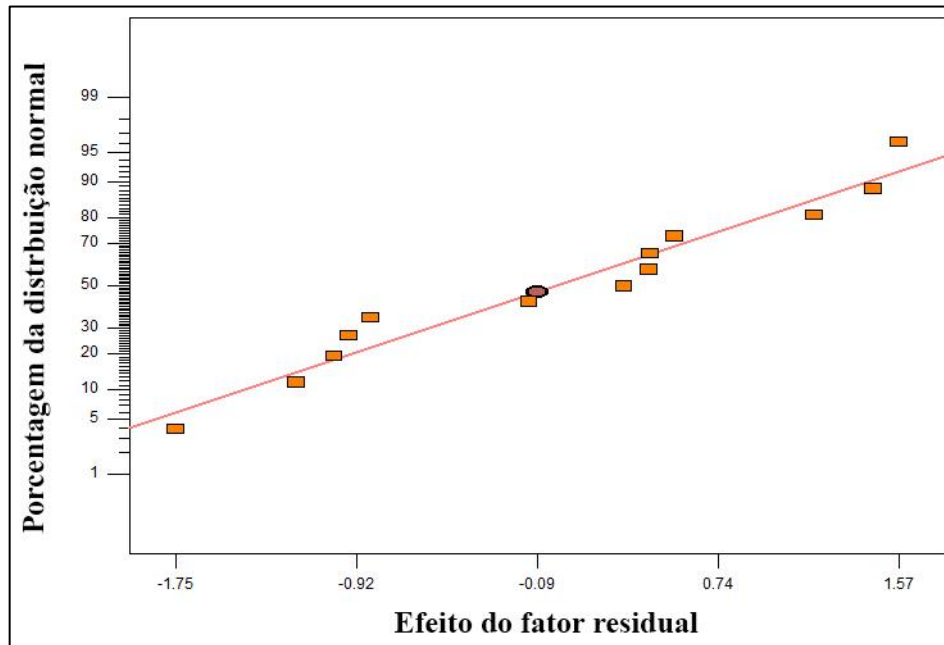
O teste F (Tabelas 17 e 18) indicou significância estatística ao nível de 99% de confiança, não sendo constatada falta de ajuste para nenhum dos modelos avaliados (nível de confiança de 90%). Verifica-se, ainda, a partir do valor de  $R^2$  que todas as equações ajustadas foram capazes de explicar mais de 80% da variabilidade dos valores experimentais. Desta forma, considerou-se que os modelos estatísticos obtidos foram adequados para descrever os processos de soldagem por OFW (em função do tempo e distância aplicada) e a soldagem a laser Yb: fibra (em função da potência e velocidade aplicada).

#### 4.1.4.1 Avaliação do modelo experimental na soldagem entre o laminado e a liga

A análise por ANOVA foi realizada com o objetivo de verificar quais são os termos significativos do modelo estudado e quais podem ser removidos, com a qual se verificou um melhor ajuste dos resultados com modelo quadrático. Entretanto, segundo Kozak (2009), esse modelo é usado inadequadamente, posto que o modelo é usado sem serem feitas maiores considerações em relação a suas restrições, como exigência de normalidade. Além disso, Abrahão (2015) relata que os valores residuais de um experimento fatorial desempenham papel importante na garantia de adequação de modelo, sendo assim, do ponto de vista matemático, a diferença entre as observações e a médias dos valores reais correspondentes (MONTGOMERY, 2017). Segundo Albiero et al. (2012), nessa situação é interessante a utilização do gráfico de probabilidade normal tanto para análise da normalidade dos dados como para escolha de parâmetros mais importantes e, além disso, esse método é eficiente em avaliar a influência de fatores distintos em um experimento, principalmente considerando a quantidade de tempo exigido para a análise, coleta de dados e uma melhor discussão dos resultados (HEO et al., 2008; KOZAK, 2009).

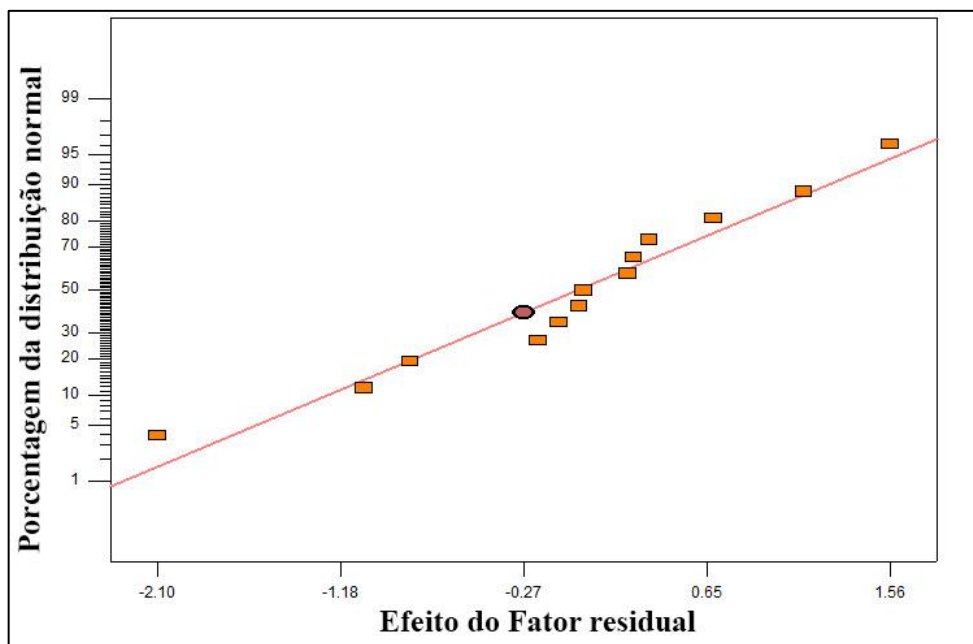
Um gráfico de probabilidade normal, de acordo com Mukhopadhyay e Silva (2008), é útil em consolidar o tamanho das amostragens experimentais de determinados parâmetros que são importantes no processo, não exigindo assim amostragens com muitos ou diversas variedades de dados. As Figuras 40 e 41 apresentam os gráficos de probabilidade normal da soldagem por OFW e a soldagem a laser Yb: fibra, respectivamente, em amostras soldadas entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3, onde é possível observar que os valores de resíduos em ajuste estão independentes e normalmente ajustados a uma certa distribuição em torno da reta nos casos avaliados.

Figura 40 - Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente a soldagem OFW em amostras soldadas entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 41 - Distribuição de resíduos em torno da reta que indica a normalidade para a variável resposta referente a soldagem a laser em amostras soldadas entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3.



Fonte: Produção do próprio autor.

O método do gráfico de probabilidade normal, de acordo com Hines et al. (2006), estipula se os dados se ajustam a uma certa distribuição presumida com base na análise visual, se alguns dos determinados pontos não se comportarem linearmente em uma função de conjunto dos dados, esse ponto pode ter algum significado estatístico. Nos gráficos das Figuras 40 e 41 é possível observar, nos dois casos avaliados, um modelo bem ajustado em relação às variáveis estudadas que, segundo Abrahão (2015), esse modelo é capaz de representar a informação sistemática contida nos dados e deixando os resíduos na parte aleatória, isto é, o ruído contido nas medições. Este fato foi constatado nos gráficos com os valores próximos à reta de ajuste.

A partir dos resultados provenientes da análise por ANOVA, foi possível compor os modelos estatísticos incluindo os coeficientes correspondentes aos efeitos significativos para o processo de soldagem dos materiais estudados. Os coeficientes relativos aos efeitos não significativos foram excluídos do modelo. Os modelos obtidos são apresentados pelas equações (7) e (8), correspondendo aos processos de soldagem por OFW e a soldagem a laser, respectivamente.

$$LSS \text{ (MPa)} = -130,964 + 1.976 * X_1 + 2,304 * X_2 - 6,685 \times 10^{-3} * X_1^2 - 7,265 \times 10^{-3} * X_2^2 - 0,019 * X_1 * X_2 \quad (7)$$

Onde  $X_1$  = O tempo de soldagem em segundos;  $X_2$  = a distância da tocha em milímetros.

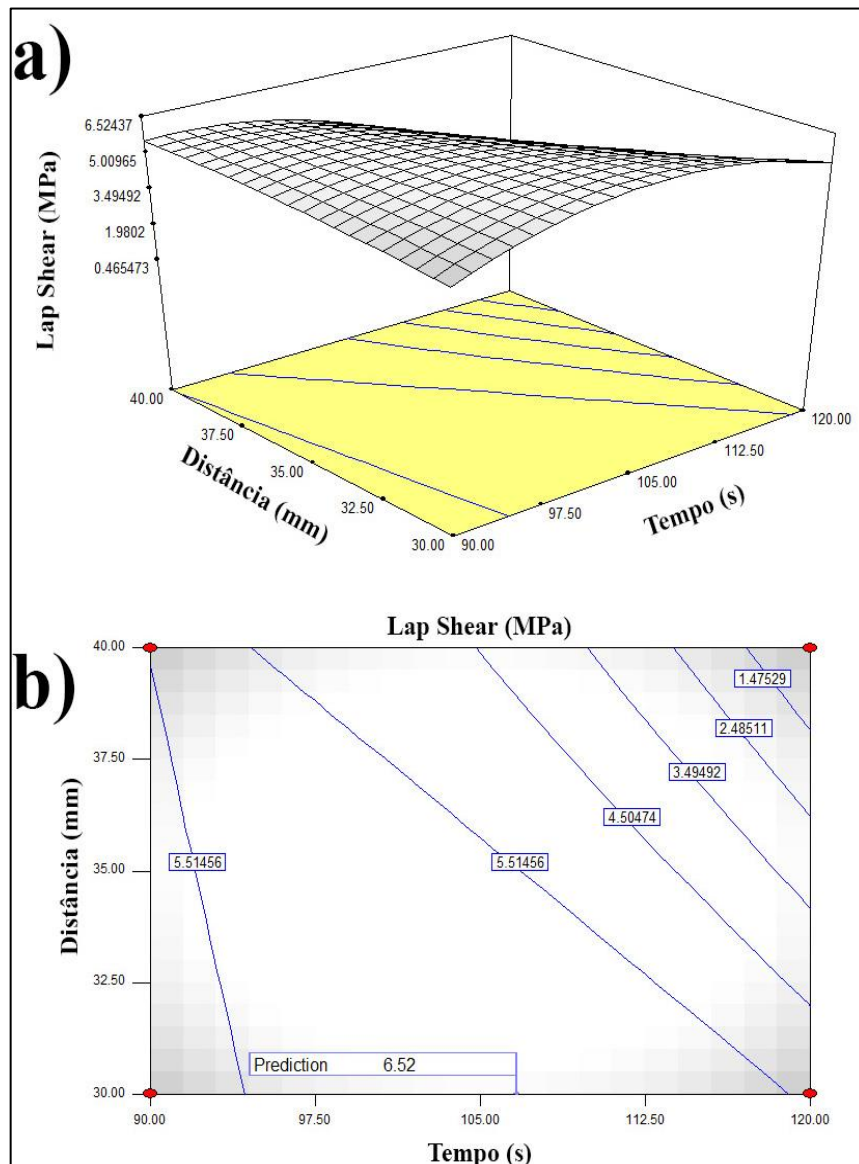
$$LSS \text{ (MPa)} = 1488,966 - 21,122 * X_3 - 2.240 * X_4 + 63,912 * X_3^2 + 8,986 \times 10^{-4} * X_4^2 - 0.100 * X_3 * X_4 \quad (8)$$

Onde  $X_3$  = A velocidade de aplicação do laser em milímetros por segundos;  $X_4$  = a potência do laser aplicado em Watts.

Geralmente, para a estimativa do coeficiente definido a partir do modelo das equações (7) e (8), utiliza-se o Método *Ordinary Least Squares* (OLS). Desta forma, constrói-se uma função aproximada relacionando as respostas de interesse com as variáveis de processo. A partir dos dados obtidos pelo programa *Design-Expert*, foi possível para este estudo prosseguir a investigação dos valores máximos de resistência obtidos por LSS dentro dos valores para as variáveis que foram estudadas. 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 LSS. As superfícies de

resposta com as regiões de otimização pelo processo de soldagem por OFW são apresentadas na Figura 42.

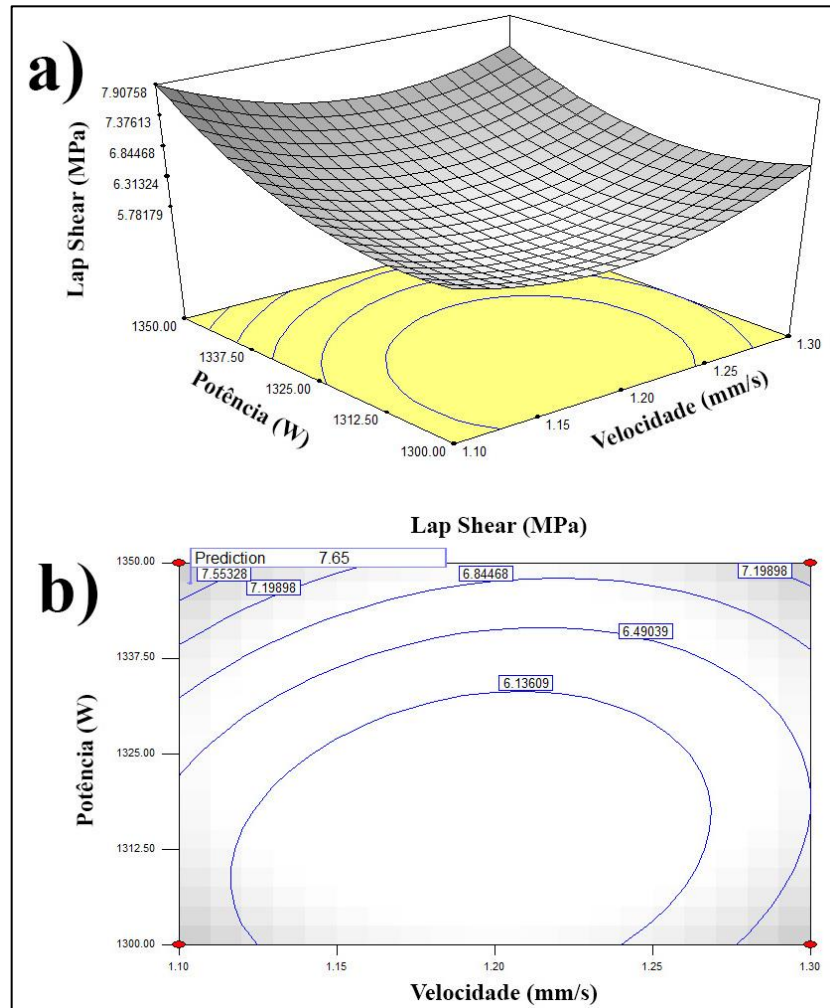
Figura 42 - a) Superfície de resposta da soldagem OFW; b) curvas de nível na soldagem entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3.



Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando estatisticamente os resultados provenientes da soldagem OFW (Figura 42) o valor máximo da variável resposta predita pelo programa de acordo com os resultados experimentais foi de 6,52 MPa, que indicou o emprego das variáveis independentes estudadas em valores aprimorados dentro das faixas pré-determinadas, sendo estas: tempo de 107 segundos e distância de 30 mm. A Figura 43 ilustra as superfícies de resposta com as regiões de otimização pelo processo de soldagem a laser Yb: fibra realizado.

Figura 43 - a) Superfície de resposta da soldagem a laser Yb: fibra; b) curvas de nível na soldagem entre o compósito PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024-T3.



Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando estatisticamente os resultados provenientes da soldagem a laser Yb: fibra (Figura 43) o valor máximo da variável resposta predita pelo programa de acordo com os resultados experimentais foi de 8,06 MPa, sendo os valores aprimorados dentro das faixas pré-determinadas: potência de 1480 W e velocidade de 1,11 mm por segundo. A partir dos resultados provenientes da análise estatística, pode ser concluído que o delineamento composto central rotacional utilizado neste estudo foi muito eficiente para a avaliação dos fatores e também para determinação das condições otimizadas de ambos os processos de soldagem utilizados. Desta forma, os modelos utilizados foram eficientes sendo possível construir superfícies de respostas correspondentes e definir regiões de interesse, a qual os maiores valores das variáveis obtidas tendem se adequar para essa tendência do limite estatístico.

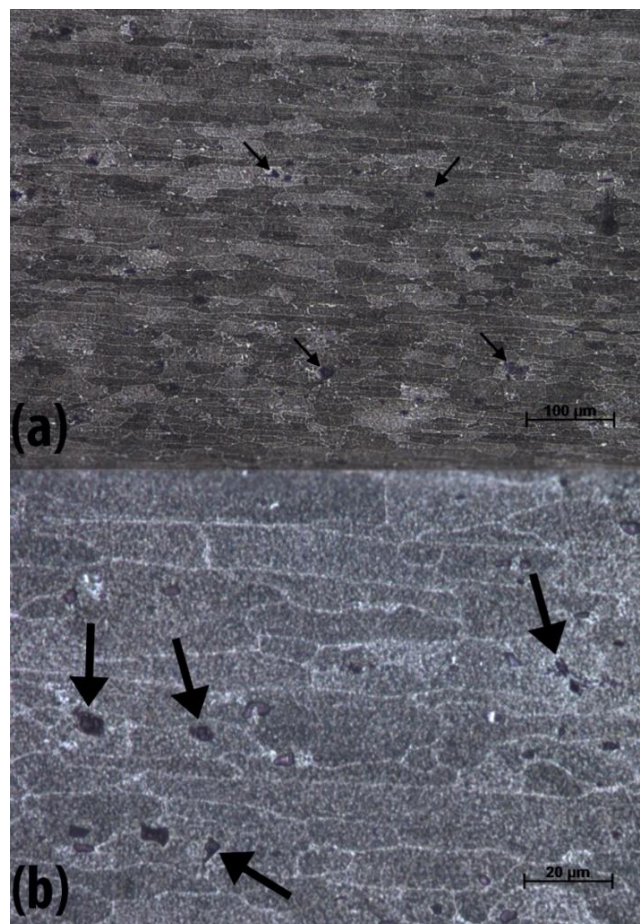
## 4.2 EFEITO DA ANODIZAÇÃO NA LIGA AA2024-T3

Nesse item, será discutido a influência da anodização na liga AA2024-T3 referente a sua morfologia e na formação da camada de óxido.

### 4.2.1 Liga AA2024-T3 como recebida

A Figura 44 (a) apresenta a microestrutura da liga AA2024-T3 como recebida. Observa-se a presença de grãos alongados no sentido da laminação e de pequenos pontos pretos (indicados por setas), que podem ser prováveis partículas de segunda fase (dispersóides) ou contaminação do metal base. A Figura 44 (b) detalha a presença dessas partículas na superfície da liga AA2024-T3 (indicado por setas).

Figura 44 - (a) Análise por microscopia óptica da liga AA2024-T3 antes da soldagem (com ampliação de 10x); (b) Presença de prováveis partículas de dispersóides ou contaminação do metal base na liga AA2024-T3 (com ampliação de 20x).



Fonte: Produção do próprio autor.

A principal razão da possível presença dessas partículas, como apresentado pela Figura 44, é a quantidade de elementos adicionados na matriz da liga AA2024-T3 que excedem o limite de solubilidade. Uma grande quantidade dessas partículas e grãos grosseiros insolúveis promoverão certa fragilização no material, resultando em uma baixa resistência mecânica, pois eles são pontos de concentradores de tensões, promovendo as formações de porosidades e vazios no material (CAVALCANTE; DA SILVA, 2017; LIN et al., 2013).

#### **4.2.2 Anodização da liga AA2024-T3**

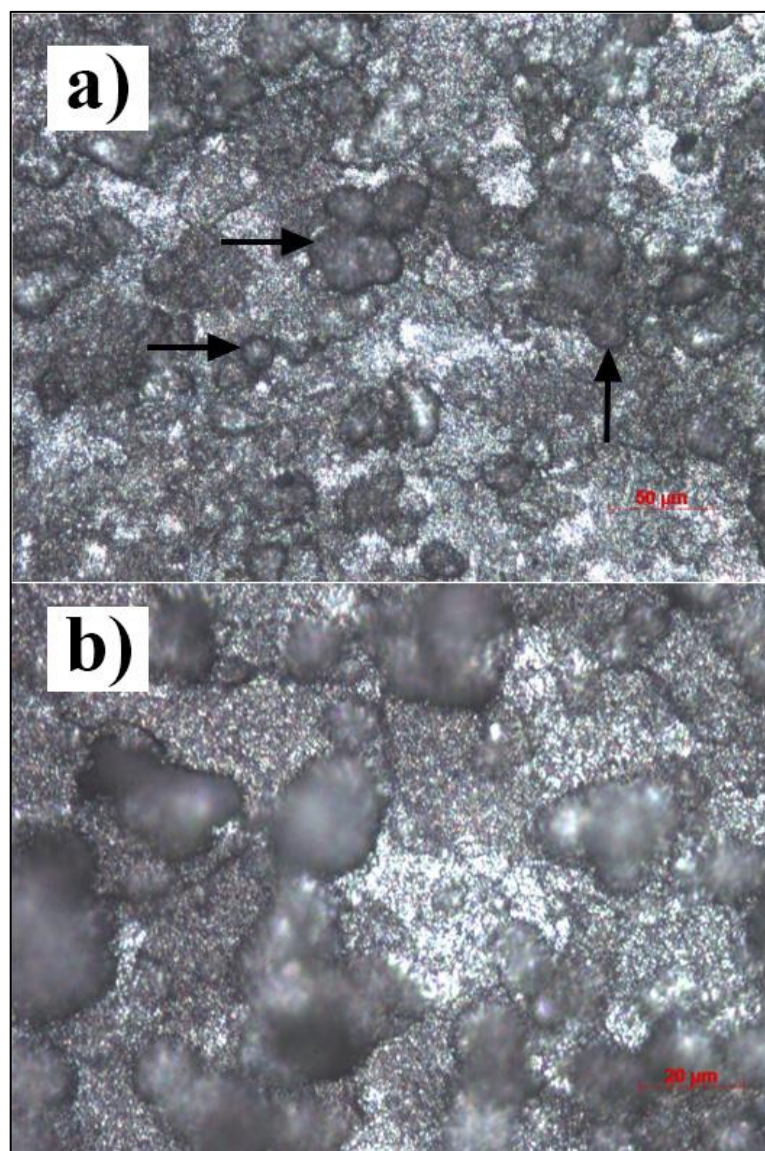
Após o estudo estatístico a partir do planejamento experimental, onde foram determinados os parâmetros otimizados para serem aplicados, foi realizado a aplicação da anodização na liga AA2024-T3 com o intuito de melhorar a interação entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 e, conseqüentemente, ocasionar uma otimização dos processos de soldagem em estudo.

A anodização é um processo eletroquímico que utiliza a capacidade quase única da alumina amorfa para desenvolver uma morfologia porosa regular, quando formada em eletrólitos ácidos e alcalinos (THOMPSON et al., 1999). Além disso, a anodização é um método de conversão da superfície de alumínio em óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), formando uma camada anódica. A anodização acelera a formação do óxido de alumínio sobre o metal base, melhorando sua resistência à corrosão e revestimento (HABAZAKI et al., 1997; THOMPSON et al., 1999). Para aplicações aeroespaciais, a anodização é comumente utilizada por razões de custo, simplicidade, desempenho do revestimento e versatilidade (DOMINGUES; FERNANDES; FERREIRA, 2003).

Os vários fatores que influenciam na formação de filmes porosos em ligas de alumínio estão relacionados ao comportamento de anodização da matriz à base de alumínio e das regiões da segunda fase (HABAZAKI et al., 1997; THOMPSON et al., 1999). Segundo THOMPSON et al. (1999), nas ligas da série 2XXX as segundas fases ricas em cobre afetam adversamente a morfologia e a integridade do filme, principalmente devido à formação de vazios relativamente grandes formados. Segundo Davis et al. (1982), na anodização da liga AA2024-T3 com uma porcentagem de 4,4% de Cobre e 1,5% de magnésio, o óxido anódico é composto predominantemente de precipitados de  $Al_2O_3$  amorfo. A Figura 45 exibe a microscopia óptica da liga AA2024-T3 anodizada, com a presença desses prováveis precipitados, sendo assinalados por setas. Segundo Domingues, Fernandes e Ferreira (2003), quando o filme

anódico de óxidos é produzido num substrato de liga AA2024-T3, a sua estrutura muda para um padrão do tipo granular.

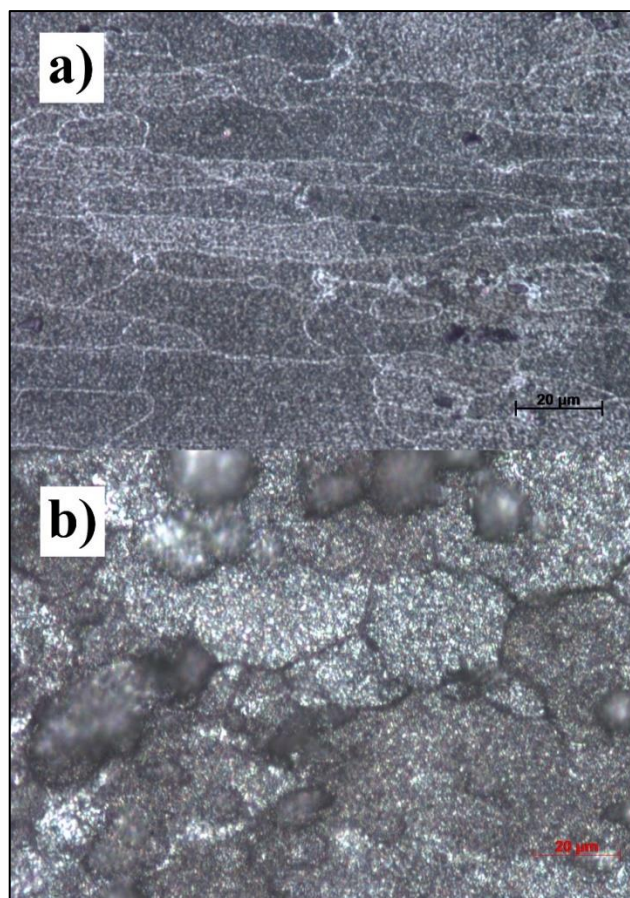
Figura 45 – a) Formação de prováveis precipitados de  $Al_2O_3$  , provenientes da anodização da liga AA2024-T3 (com ampliação de 20x); b) detalhes da microestrutura da liga AA2024 após o processo de anodização (com ampliação de 50x).



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 46 (a) ilustra a microestrutura da liga AA2024-T3 como recebida e a Figura 46 (b) representa a liga anodizada, afim de comparação (ambas as condições com ampliação de 50x). Como descrito no item anterior, a liga AA2024-T3 como recebida são compostas de grãos alongados direcionados no sentido da laminação e com estas ligas anodizadas, suas estruturas mudam próximas a uma estrutura granular.

Figura 46 – Microestrutura da liga AA2024-T3: a) como recebida; b) após a anodização.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 4.3 ENSAIO DE RUGOSIDADE

Após a anodização, o ensaio de rugosidade foi realizado com o intuito de se determinar, matematicamente e experimentalmente, se houve um aumento na rugosidade e, conseqüentemente, ocasionar um aumento no intertravamento entre as amostras a serem soldadas.

Para este propósito, a rugosidade superficial foi calculada a partir de duas amostras da liga AA2024-T3, nas condições de como recebida e anodizada. Cinco medidas foram realizadas na área de soldagem (25 x 25 mm) para cada amostra selecionada. Os valores de Ra e Rz obtidos são apresentados pela Tabela 19.

Analizando a Tabela 19, a amostra da liga AA2024-T3 anodizada obteve, como esperado, o maior valor médio de Ra (2,94 µm), se comparado com a amostra como recebida (2,12 µm), corroborando com a análise inicial para a maior efetividade de intertravamento entre as amostras a serem soldadas.

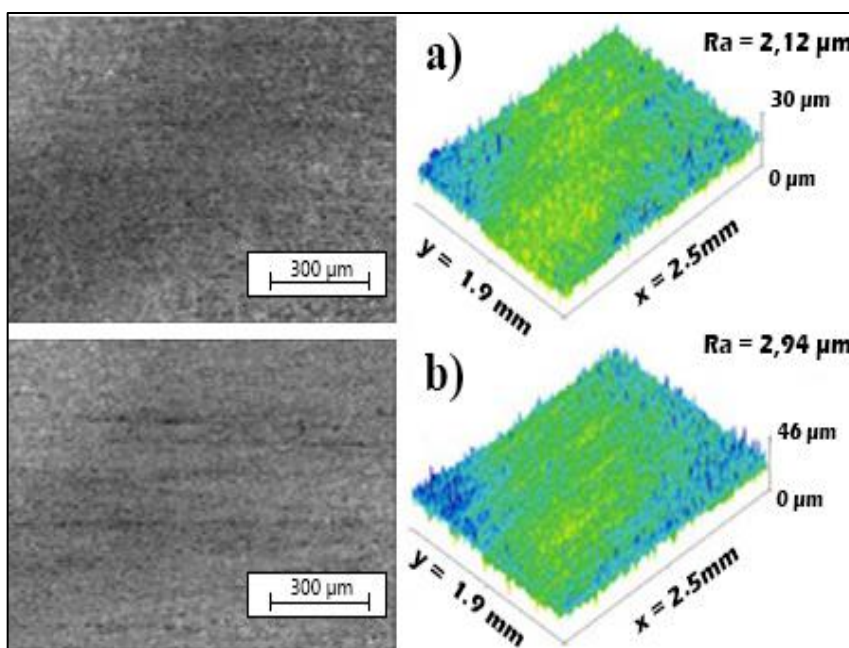
Tabela 19 - Valores de rugosidade, Ra e Rz, com suas respectivas médias e desvio padrão.

| Condições AA2024-T3  |                      |                      |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Como recebido        |                      | Anodizado            |                      |
| Ra ( $\mu\text{m}$ ) | Rz ( $\mu\text{m}$ ) | Ra ( $\mu\text{m}$ ) | Rz ( $\mu\text{m}$ ) |
| $2,12 \pm 0,05$      | $32,39 \pm 4,18$     | $2,94 \pm 0,18$      | $48,55 \pm 3,45$     |

Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores de Rz (diferença de altura entre a média dos picos mais altos e os vales mais baixos ao longo do comprimento de avaliação do perfil da amostra) para a liga AA2024-T3 anodizada ( $48,55 \mu\text{m}$ ), se comparado a liga como recebida ( $32,39 \mu\text{m}$ ) foi maior, podendo ser explicado pela maior presença de precipitados grosseiros presentes a partir da anodização, que pode ocasionar grandes picos e longos vales na superfície da liga. A Figura 47 apresenta a topografia e os gráficos de superfície realizados para essa análise.

Figura 47 - Topografias da superfície da liga AA2024-T3: a) Como recebida; b) anodizada.



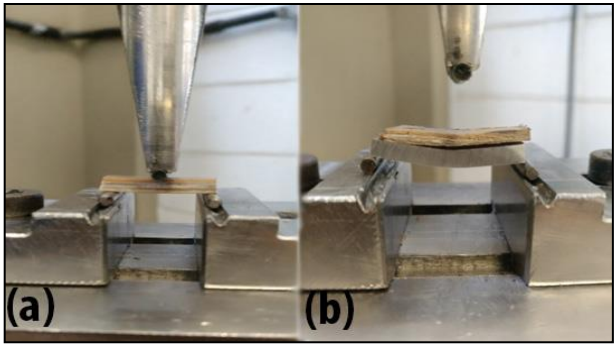
Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.4 VIABILIDADE DO ENSAIO DE ILSS EM JUNTAS SOLDADAS DISSIMILARES

O ensaio ILSS foi realizado visando avaliar o cisalhamento interlaminar e comparar esta propriedade com o cisalhamento na região soldada. Entretanto, para uma união que envolve materiais dissimilares, não há resultados descritos na literatura a partir desse tipo de

caracterização, então esse item consiste na viabilidade de se aplicar esse tipo de ensaio mecânico em juntas soldadas de materiais dissimilares. Para isso, amostras de laminado e a liga de alumínio foram soldadas pelo processo por OFW. A Figura 48 apresenta o ensaio realizado na amostra soldada envolvendo camadas do compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3.

Figura 48 – Ensaio de ILSS - (a) amostra submetida ao ensaio de ILSS; (b) amostra fraturada após o ensaio.



Fonte: Produção do próprio autor.

Com base nos melhores valores dos parâmetros obtidos estatisticamente, foram realizadas, nas mesmas condições, a soldagem para o ensaio de ILSS. Os resultados obtidos a partir dos ensaios ILSS para a junta soldada do compósito PEI e a liga AA2024-T3, assim como, valores de ILSS disponíveis na literatura, são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Comparações com a literatura do ensaio ILSS realizado com a matriz PEI.

| Material Soldado                | Processo             | Valor (MPa)   | Referência         |
|---------------------------------|----------------------|---------------|--------------------|
| AA2024-T3<br>PEI/Fibra de vidro | OFW                  | 25,28 ± 2,89  | Nesse Estudo       |
| PEI/Fibra de carbono            | Adesivo              | 20,00 ± 28,00 | Dai e Ye (2002)    |
| PEI/Fibra de carbono            | Resistência Elétrica | 63,00 ± 4,03  | REIS et al. (2018) |

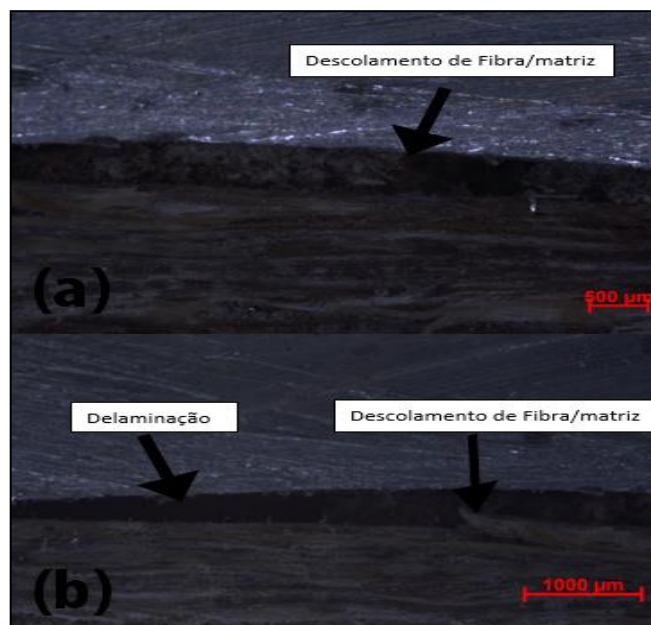
Fonte: Produção do próprio autor.

Como pode ser evidenciado na Tabela 20, os valores obtidos são semelhantes aos encontrados na união por adesivo. No entanto, se comparados por resistência elétrica, estes possuem uma redução de aproximadamente 40%. Entretanto, como descritos anteriormente, na literatura não há especificamente esse tipo de ensaio para juntas que envolvem esses materiais

em estudo. Isso pode ser explicado pela grande dissimilaridade física entre os dois materiais envolvidos e, além disso, a fratura da junta soldada ocorre especificamente no material compósito e não na interface da junta soldada.

A redução nos valores de ILSS do laminado possivelmente pode ter sido causada pela presença de delaminação que, segundo Goushegir, Dos Santos e Amancio-Filho (2014), esse fenômeno pode estar relacionado pela diferença do coeficiente de expansão térmica entre as fibras e matrizes poliméricas após a solidificação, reduzindo as propriedades de adesão entre as fibras de vidro e a matriz polimérica PEI, ocorrendo a delaminação e o descolamento fibra/matriz durante o processo. Além disso, com o aprimoramento do dispositivo de soldagem, específico para esse tipo de ensaio, pode-se obter resultados mais satisfatórios sem a presença demasiada de defeitos. A Figura 49 apresenta a falha ocorrida na junta soldada do compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 após a realização do ensaio por ILSS, caracterizando-se pela presença de defeitos no compósito e não na interface soldada.

Figura 49 – Análise da união entre o compósito e a liga AA2024-T3 fraturada após o ensaio ILSS: (a) descolamento de fibra/matriz; (b) presença de delaminações e descolamento de fibra/matriz possivelmente devido ao processo de solidificação.



Fonte: Produção do próprio autor.

Afirma-se então, a partir dessa análise, que o ensaio de ILSS não pode ser utilizado para avaliar uma interface entre juntas soldadas dissimilares, sendo apenas possível avaliar o cisalhamento interlaminar que ocorre especificamente no material compósito.

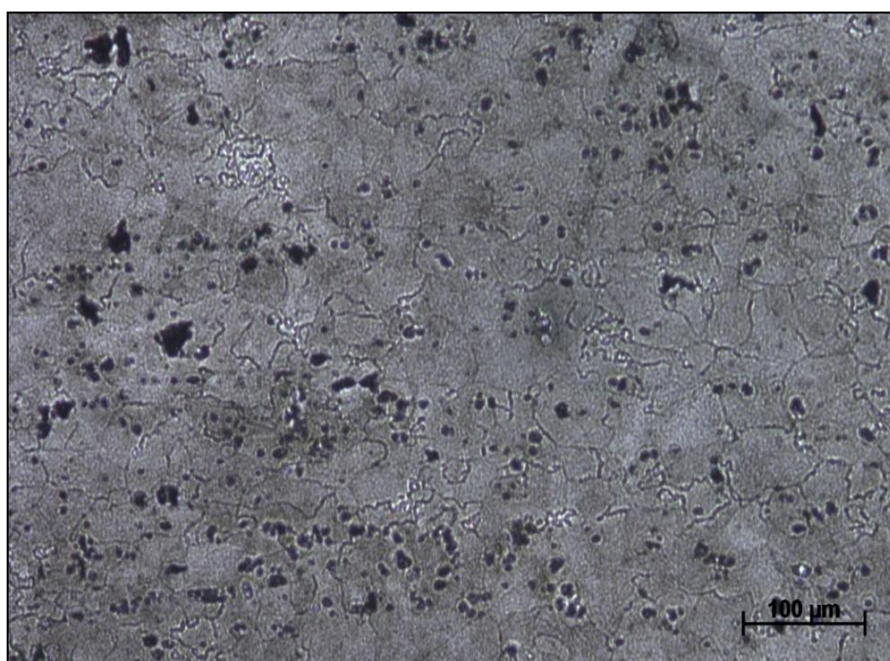
## 4.5 SOLDAGEM POR OFW

Para a caracterização da soldagem por OFW, foi analisada a influência do processo na liga AA2024-T3, na qual foi exposta a chama GLP.

### 4.5.1 Influência da chama GLP na soldagem OFW na liga AA2024-T3

Como visto no item 4.2.1, a liga AA2024-T3 como recebida é composta de grãos alongados direcionados no sentido da laminação. Após a realização da soldagem OFW, foi analisada a influência da chama GLP do processo na microestrutura da amostra soldada. A Figura 50 exibe a microestrutura da liga AA2024-T3 da união com o compósito PEI/fibra de vidro que foi exposto a chama de GLP.

Figura 50 - Microestrutura da liga AA2024-T3 após a soldagem por OFW.



Fonte: Produção do próprio autor.

Como observado a partir da Figura 50, a presença de grãos alongados presentes na liga AA2024-T3 como recebida (como visto na Figura 42) são convertidos em uma nova estrutura de grãos equiaxiais, a partir da recrystalização dos grãos, assim como observado por Li, Murr e McClure (1999), Cavaliere et al. (2006) e Guo, Ma e Wang(2018b).

Essa zona equiaxial é caracterizada por grãos que crescem com direções cristalográficas aleatórias. A recrystalização é geralmente acompanhada por uma redução na resistência e na

dureza de um material e de um resultante aumento na ductibilidade (BRZOSTEK, 2012). Este fenômeno foi causado devido a exposição da liga AA2024-T3 a chama de soldagem, visando a união com o laminado por condução térmica. Com o intuito de se determinar se houve uma influência nas propriedades da liga AA2024-T3 após a soldagem, foi realizado o ensaio de dureza Vickers (HV), sendo esses resultados apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados provenientes da dureza Vickers para a liga como recebida e após a soldagem por OFW.

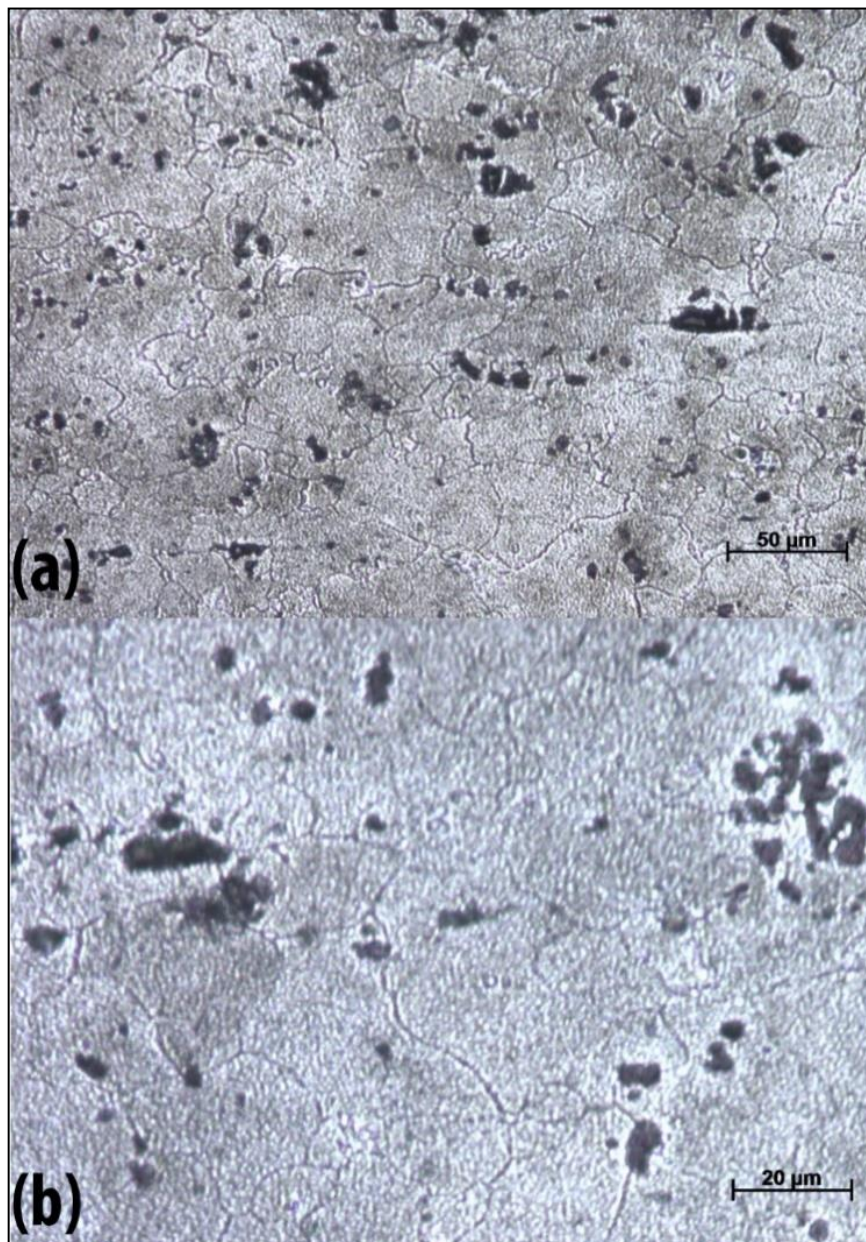
| <b>Condição</b>                    | <b>HV</b> |
|------------------------------------|-----------|
| Liga AA2024-T3 como recebida       | 140 ± 1,2 |
| Liga AA2024-T3 após a soldagem OFW | 107 ± 0,9 |

Fonte: Produção do próprio autor.

Como observado a partir da Tabela 21, a média dos valores de dureza Vickers para a liga AA2024-T3 como recebida é próxima aos valores encontrados em literatura para este material (138-145 HV) (CAIAZZO et al., 2013; CAVALIERE et al., 2006; LIN et al., 2013).

Observa-se, também, a redução significativa na dureza para a liga AA2024-T3 após a soldagem, com um valor médio de 107 HV, sendo essa redução podendo ser explicada por dois motivos: (1) De maneira geral, a literatura mostra que os materiais, quando expostos a temperaturas demasiadamente baixas ou altas (dependendo do processo), favorecem picos de dureza inferiores (KLIAUGA; VIEIRA; FERRANTE, 2008; WANG, 2003). A respeito da liga AA2024-T3, T3 é uma designação que se aplica às ligas que são trabalhadas a frio, e têm sua resistência aumentada pelo tratamento de solubilização aplicado, seguido de envelhecimento natural, que ocorre à temperatura ambiente. Porém, quando o material foi exposto à chama de soldagem, devido ao recozimento, a resistência obtida é perdida e causa essa redução na dureza; (2) O que determina as propriedades nessa liga envelhecida são precipitados do tamanho nanométrico. A dureza da liga após a soldagem é reduzida devido a sua exposição ao aquecimento. Os elementos de liga que estavam formando esses precipitados do tamanho nanométrico são segregados e formam dispersóides com um tamanho muito maior e que não tem mais efeitos sobre a microestrutura, ocasionando essa redução de dureza. Além disso, se um material é resfriado rapidamente, a densidade de discordâncias é bem elevada, o que aumenta a dureza. A Figura 51 ilustra, em detalhes, a presença dessas prováveis partículas discutidas.

Figura 51 – (a) Maior presença de prováveis dispersóides na superfície da liga AA2024-T3; (b) Detalhe dos prováveis dispersóides presentes na liga, devido a segregação dos elementos de liga frente ao aquecimento proveniente da soldagem OFW.



Fonte: Produção do próprio autor.

A partir das Figuras 50 e 51, observa-se uma maior presença de dispersóides presentes na liga AA2024-T3 após a soldagem, assim como esperado, devido ao processo de segregação. Ainda, segundo Lin et al. (2013), a dureza do alumínio é afetada pelo tipo, densidade e comprimento dos precipitados presentes. Entretanto, com os parâmetros de soldagem otimizados e a realização da anodização da liga AA2024-T3, pode-se produzir precipitados mais finos e melhores distribuídos, aumentando assim a dureza.

#### 4.5.2 Análise microestrutural da união do laminado e a liga pelo processo OFW

Os parâmetros de soldagem obtidos experimentalmente e otimizados a partir de um estudo estatístico, foram avaliados nesse estudo. Assim, na soldagem por OFW, foram obtidos os parâmetros otimizados a partir do planejamento experimental (com um tempo de 107 s de aplicação da chama e uma distância de 30 mm do maçarico da amostra). Além disso, visando ainda mais a otimização do processo, as amostras da liga AA2024-T3 foram submetidas a anodização para uma melhor interação com o laminado. A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos nas condições descritas dessa união, envolvendo os ensaios de LSS, com a utilização do dispositivo otimizado.

Tabela 22 - Valores de LSS da união entre a liga AA2024-T3 anodizada e o compósito PEI/fibra de vidro obtidos com os parâmetros otimizados.

| Liga AA2024-T3 Anodizada | LSS (MPa) |
|--------------------------|-----------|
| 1                        | 11,22     |
| 2                        | 4,45      |
| 3                        | 10,59     |
| 4                        | 13,80     |
| 5                        | 12,48     |
| 6                        | 10,56     |
| 7                        | 12,89     |
| 8                        | 13,01     |
| <b>Média</b>             | 11,13     |
| <b>Desvio Padrão</b>     | ± 2,95    |

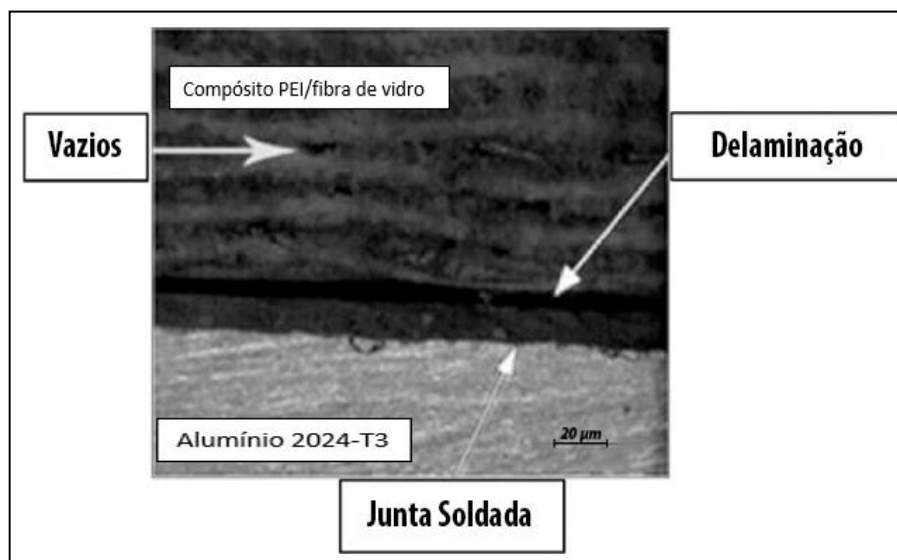
Fonte: Produção do próprio autor.

Como é observado a partir da Tabela 22, o maior valor de LSS obtido (13,80 MPa) se comparado ao maior valor obtido de LSS na união entre a liga AA2024-T3 (não anodizada) com o laminado (6,91 MPa – Tabela 15) é maior que o dobro, comprovando a efetividade da anodização para a realização de juntas soldadas dissimilares, como esperado.

Com a finalidade de se analisar a eficiência do processo de soldagem por OFW em obter juntas entre metal/polímero de boa qualidade e comprovar a otimização dos resultados obtidos, foram realizadas as análises da microestrutura da união entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3. Como observado pela Tabela 22, a partir da avaliação da amostra 2 obteve-

se um valor bem baixo (4,5 MPa) quando comparado ao valor médio obtido (11,3 MPa) e isso pode ser explicado a partir da análise da Figura 52.

Figura 52 – Análise por microscopia óptica da união entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 com os parâmetros otimizados de tempo e distância.



Fonte: Produção do próprio autor.

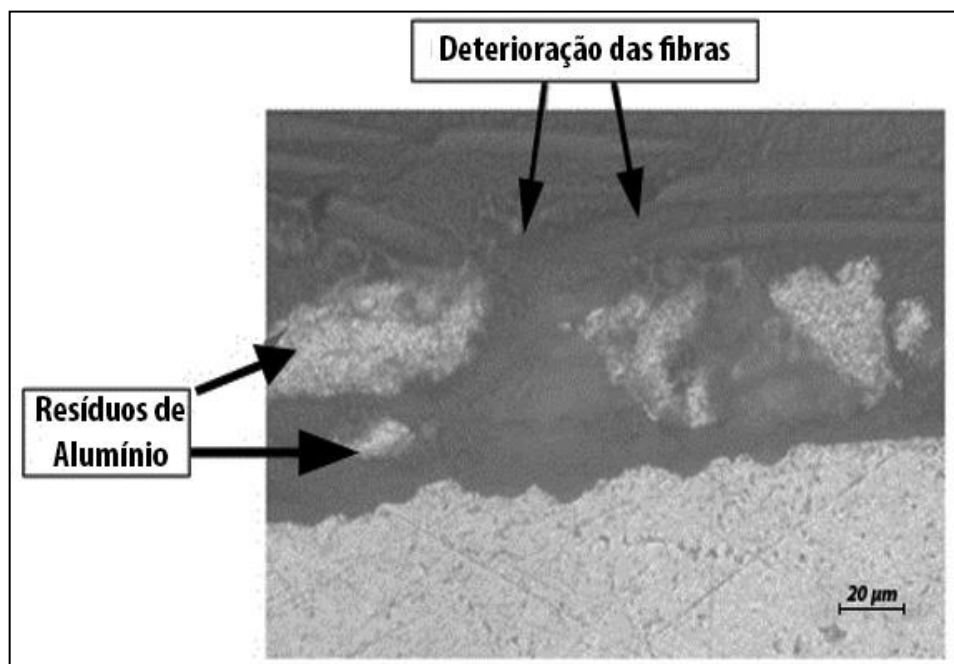
Na Figura 52 encontra-se ilustrada uma amostra soldada nas condições otimizadas entre o PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 anodizada com a presença de delaminação no laminado. No decorrer do processo, se não houver uma adequada proteção do laminado ou uma interação não efetiva entre os dois materiais a serem soldados, a junção poderá apresentar excessivas delaminações ou vazios. Como apresentado na Figura 52, essas excessivas presenças de delaminações e vazios podem ter causado essa redução do valor de LSS significativa como apresentado na Tabela 22 (amostra 2), reduzindo demasiadamente a resistência da junta soldada, se comparado aos valores médios obtidos a partir desses ensaios.

Neste estudo, os componentes são aquecidos ao ponto em que a temperatura de transição vítrea do compósito PEI/fibra de vidro seja obtida, ocorrendo um contato íntimo entre as superfícies do laminado e a liga AA2024-T3, denominado fase de amolecimento da matriz polimérica. A quantidade e extensão da delaminação presente no laminado, podem estar diretamente relacionados com essa quantidade de calor da chama gerado durante o processo e a pressão do aperto aplicado durante a soldagem e no resfriamento, assim como observado por Goushegir, Dos Santos e Amancio-Filho (2014). Além disso, na Figura 52, observa-se a presença de vazios na interface entre as fibras e a matriz de PEI.

Como relatado por Goushegir, Dos Santos e Amancio-Filho (2014), esses vazios podem ser devido ao aprisionamento de ar na camada do polímero que, quando amolecido, ocorre o escoamento da matriz. De acordo com Lionetto, et al. (2018), dependendo da energia de soldagem (no caso deste estudo a aplicação da chama) pode ser causada uma deformação plástica na superfície da liga AA2024-T3 e nas interfaces das fibras. Segundo os trabalhos de Shi et al. (2013) e Barbosa, et al. (2018), a combinação entre temperatura e pressão reduz a heterogeneidade na interface e a formação de vazios na região de soldagem, podendo ser derivados de voláteis como umidade e/ou solventes residuais presentes no laminado, como também causados por pressão de compactação insuficiente durante a moldagem, ou nucleados com baixos níveis de tensão ou a degradação observada pela matriz polimérica PEI.

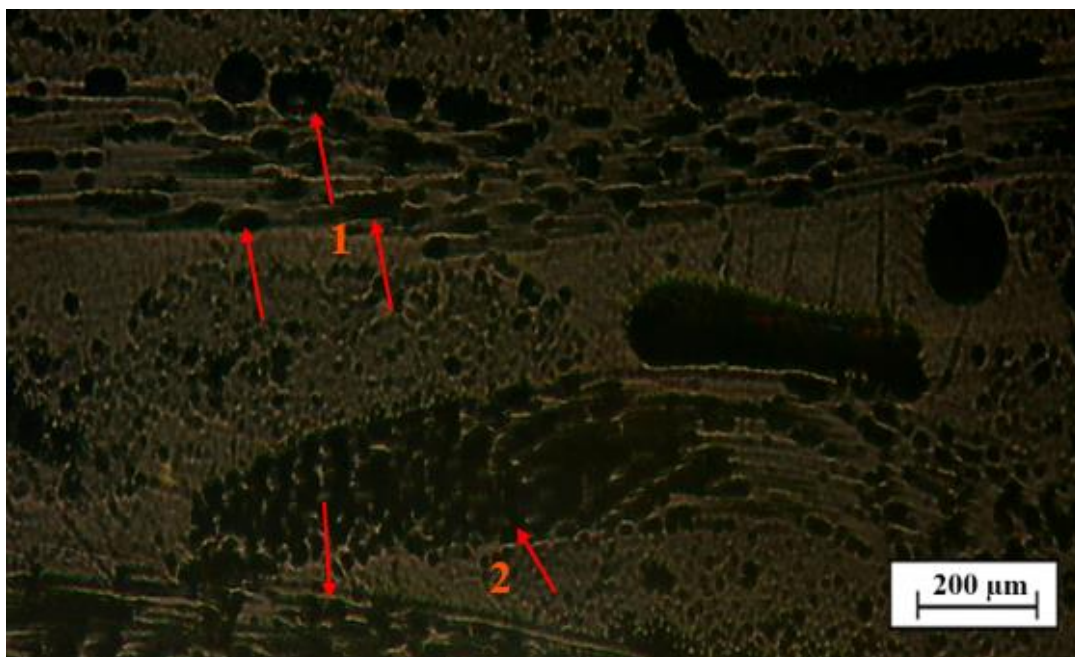
Sem uma devida proteção do dispositivo durante o processo de soldagem, pode-se ocorrer uma entrada excessiva de calor da chama nos componentes, ocorrendo alguns danos na junção dos dois materiais, conduzindo a deterioração das fibras do laminado e a presença de resíduos de alumínio, defeito semelhante como aquele relatado por Lionetto, et al. (2018) e evidenciado pela Figura 53. Já a Figura 54 apresenta a morfologia do laminado após a soldagem sem uma devida proteção.

Figura 53 - Deteriorações de fibras e resíduos de alumínio presentes na matriz polimérica, ocorridas pelo excesso de calor da chama.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 54 - Baixa qualidade da microestrutura do laminado PEI/fibra de vidro sem a devida proteção pelo processo OFW.



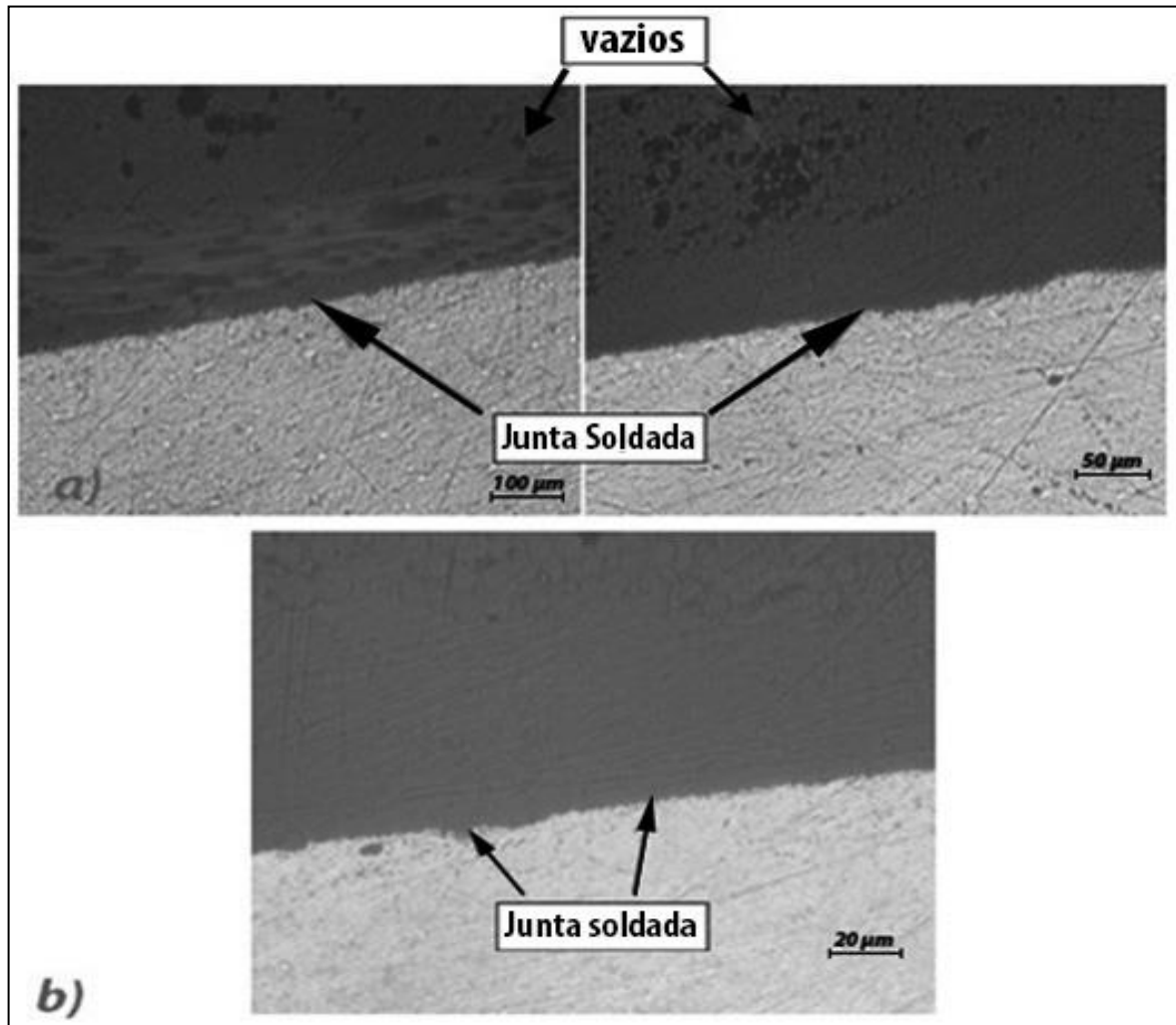
Fonte: Produção do próprio autor.

As setas observadas na Figura 54 indicam os defeitos apresentados, onde 1 é a presença demasiada de vazios concentrados em regiões das fibras, onde aponta a falta de distribuição uniforme do calor durante o processo e 2 são as falhas por descolamento fibra/matriz, a partir da exposição do laminado a temperaturas elevadas do processo, sem a adequada proteção da chama.

A Figura 55 apresenta a região da junta soldada entre a liga AA2024-T3 anodizada e o compósito PEI/fibra de vidro, sendo comparado as microestruturas com a presença de defeitos e as sem defeitos, a partir da aplicação correta da proteção do laminado frente ao processo por OFW.

Como observado na Figura 55 (a), o laminado apresenta alguns vazios, oriundos do processo de soldagem por OFW, indicando que não houve uma proteção suficiente para o processo. Isso pode ser confirmado pela Figura 55 (b), pois com uma devida proteção dos componentes, aliados aos parâmetros otimizados estatisticamente que mais se adequam ao processo, pode-se obter juntas efetivas com maiores valores de LSS, com poucas ou nenhuma presença de vazios e sem a presença de delaminações. Além disso, uma otimização do dispositivo de soldagem, com um material refratário mais resistente e fácil adaptação do molde deve melhorar os resultados provenientes das juntas entre metal/compósito.

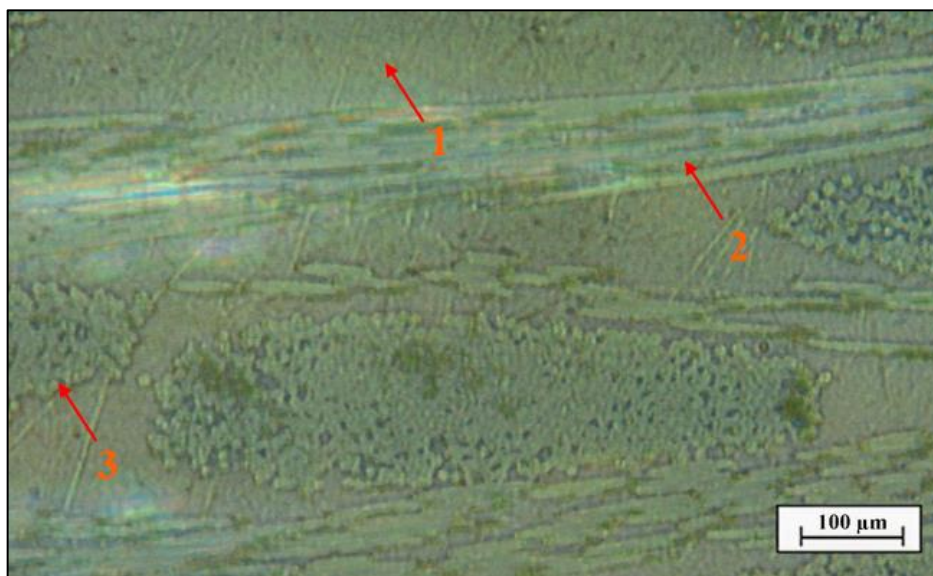
Figura 55 - Junta soldada entre o laminado com a liga AA2024-T3 anodizada: a) presença de vazios no laminado, devido a falta de proteção no processo; b) sem a presença de vazios com a devida proteção no processo.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 56 apresenta a morfologia, em detalhes, do compósito PEI/fibra de vidro após a soldagem por OFW. A partir dos resultados encontrados, é observado que mesmo após a soldagem, a sua microestrutura não se alterou, não apresentando defeitos oriundos do processo, sem a presença de degradação ou vazios que pudessem interferir nas propriedades do material. Na Figura 56 as setas indicam as características morfológicas do material, onde: 1 é a matriz polimérica PEI, 2 fibras no sentido longitudinal e 3 são as fibras no sentido transversal.

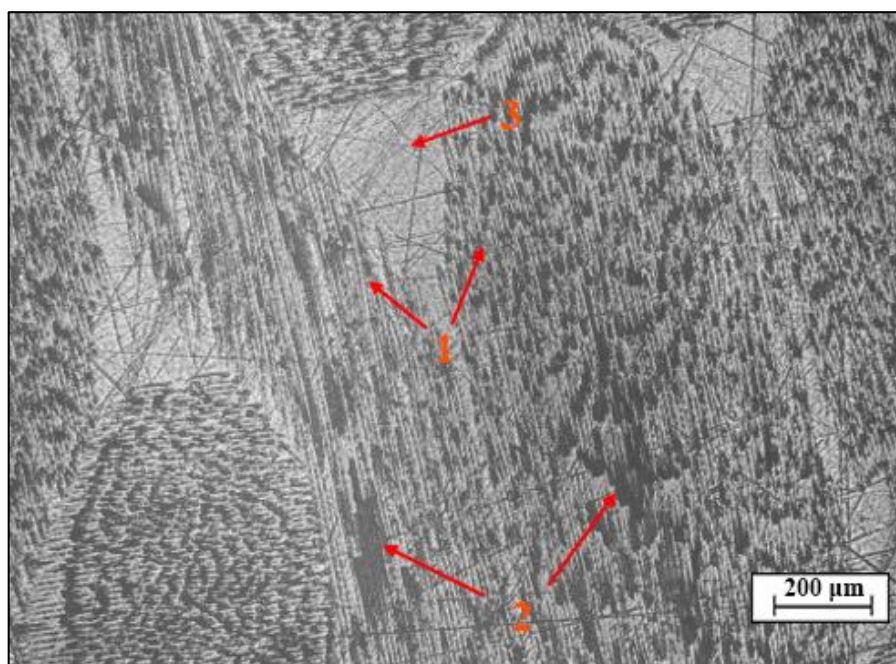
Figura 56 - Morfologia do compósito PEI/fibra de vidro após a soldagem por OFW (ampliação de 10x).



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 57 ilustra a microscopia realizada no laminado após o processo de soldagem e o ensaio de LSS, onde foi averiguado a interação entre a matriz polimérica e a liga AA2024-T3 anodizada após a ruptura.

Figura 57 – Análise por microscopia óptica do compósito PEI/fibra de vidro fraturada após o ensaio de LSS.



Fonte: Produção do próprio autor.

As setas indicam os elementos fundamentais da análise onde 1 são as fibras em sentido longitudinal e transversal, 2 são as marcas provocadas pelo estiramento da matriz polimérica durante o ensaio de LSS e 3 é a matriz polimérica e, ainda, é possível observar a ausência de vazios concentrados em regiões do laminado. A ausência de vazios concentrados em determinadas regiões aponta para uma distribuição uniforme do calor durante o processo de soldagem OFW em função da temperatura e pressão aplicados de maneira eficiente.

#### 4.6 PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER POR YB: FIBRA

Nesse item serão descritos as informações e os resultados obtidos a partir da soldagem a laser preliminar em amostras soldadas entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3. Além disso, será relatado as otimizações realizadas na soldagem a laser Yb: fibra a partir dos dados obtidos pelo planejamento estatístico e da anodização da liga AA2024-T3.

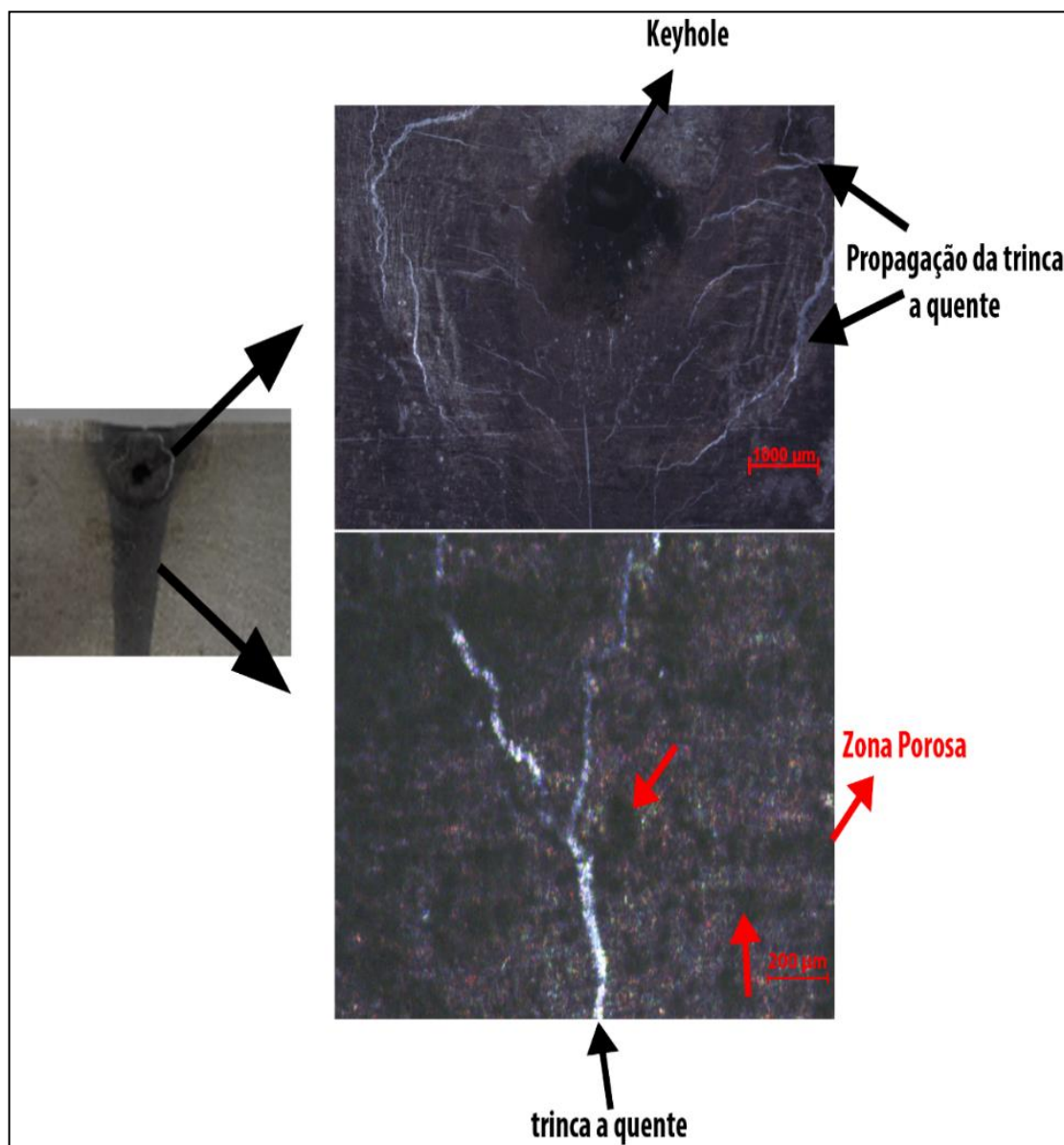
##### 4.6.1 Métodos de soldagem a laser Yb: Fibra

Na determinação dos parâmetros de soldagem a laser, como descrito no item 4.1.2, dois métodos de soldagem foram utilizados neste estudo: *keyhole* e condução térmica. Como relatado por Sánchez-Amaya e Boukha (2012), sob o regime de *keyhole*, a alta energia de entrada permite a obtenção de juntas de penetração profunda, embora provoque alta evaporação do metal. Em contraste, o regime por condução térmica é um processo mais estável, uma vez que a evaporação do metal é diminuída devido à menor energia do laser de entrada. A Figura 58 apresenta a microestrutura do alumínio exibindo, em detalhes, a formação da *keyhole* e, conseqüentemente, as presenças de trincas e porosidade.

Enquanto o alumínio puro não é suscetível ao trincamento a quente, devido à ausência de baixo ponto de fusão eutético no contorno de grão, a adição de elementos de liga como cobre, magnésio e silício à liga AA2024-T3 faz com que sua composição seja suscetível a trincas (AHN et al., 2017b, 2018).

Como indicado na Figura 58, o trincamento a quente pode ser explicado como um mecanismo de fratura de alta temperatura e pode se referir a fissuras de solidificação que ocorrem de forma intergranular ao longo do contorno de grão do metal de solda durante a solidificação, devido às tensões atuantes nos constituintes segregados de baixo ponto de fusão na zona termicamente afetada (ZTA) pelo calor ao longo do limite de fusão, como resultado da liquefação da fronteira de grãos dos constituintes de baixo ponto de fusão (AHN et al., 2017a).

Figura 58 - Formação de trincas a quente e porosidades na liga AA2024-T3 soldada com o compósito PEI/fibra de vidro.



Fonte: Produção do próprio autor.

Como relatado por Ahn et. (2018), a trinca a quente se tornou mais propensa em velocidades de soldagem mais rápidas, pois o aumento da taxa de solidificação pode induzir contração térmica e aumentar o gradiente de tensão, resultando em uma alta taxa de início de trincas e reduzindo o tempo de limites de grão para preencher as trincas iniciadas, podendo ser explicado o baixo valor de resistência obtido entre as juntas metal/polímero soldadas.

Conforme relatado por Ahn et al. (2017a), o processo de vaporização, ocasionado pela presença do *keyhole*, envolve o transporte dos elementos presentes na liga de alumínio (zinco, silício, cobre e ferro) para a superfície da poça de fusão e, em seguida, a vaporização na

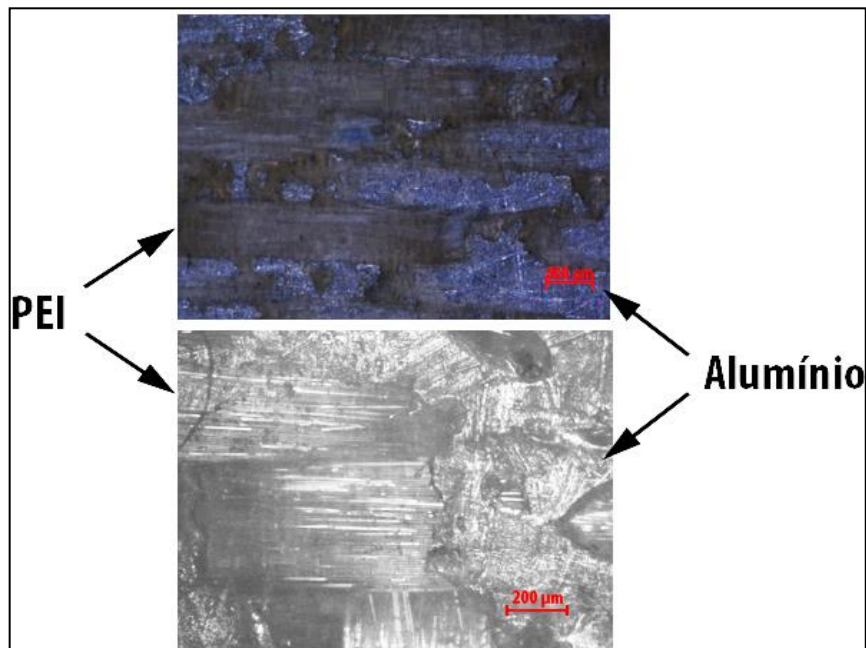
interface fluido/vapor para as fases de gás envolvente. Sánchez-Amaya et al. (2012) mencionam que os constituintes da liga também desempenham um papel importante na soldabilidade e na susceptibilidade a trincas a quente. Segundo Pramanik et al. (2017) o principal fator que afeta a resistência da junta que envolve ligas de alumínio 2xxx é a reação interfacial entre a liga metálica e fases reforçadas na poça de fusão. Microestruturas desta região mostram a presença de produtos frágeis de reação, resultando na diminuição das propriedades mecânicas e, conseqüentemente, facilitando a propagação da trinca.

Como apresentado na Figura 58, a aparição de poros na superfície da liga AA2024-T3, segundo Pramanik et al. (2017) e Ahn et al. (2018), é atribuído ao aprisionamento de gás durante a soldagem e subsequentes processos de solidificação graças à vaporização de elementos de baixo ponto de fusão, decorrentes da formação da *keyhole*. Além disso, como relatado por Ahn et al. (2018), a formação dos poros é devida tanto aos pontos de fusão e ebulição do material original, quanto aos elementos de liga, neste caso, o magnésio em ligas AA2024-T3. A presença de porosidade na solda deteriora significativamente o desempenho da junta. A falha da junta ocorre na zona porosa da liga AA2024-T3, mas não nas interfaces de união do compósito/alumínio, assim como descrito por Pramanik et al. (2017).

Ahn et. (2018) relatou que uma taxa de solidificação mais lenta devido a maior potência do laser faz com que os elementos da impureza se difundam para a poça fundida e a microestrutura resultante é enfraquecida, tornando suscetível a trincas. A sensibilidade ao trincamento a quente e a porosidade da liga 2024 pode ser reduzida controlando o processo de solidificação durante a soldagem, otimizando os parâmetros de soldagem e, além disso, uma poça de fusão suficientemente ampla, com menores velocidades de soldagem, reduz-se o risco de trincamento, tensões e porosidade (AHN et al., 2017a, 2018).

Já os resultados da soldagem a laser por condução térmica obtiveram um melhor intertravamento entre a liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro, sem a presença evidente de trincas de solidificação. A Figura 59 apresenta resultados provenientes da macroscopia óptica de uma amostra da liga AA2024-T3 fraturada após o ensaio de LSS com o PEI impregnado.

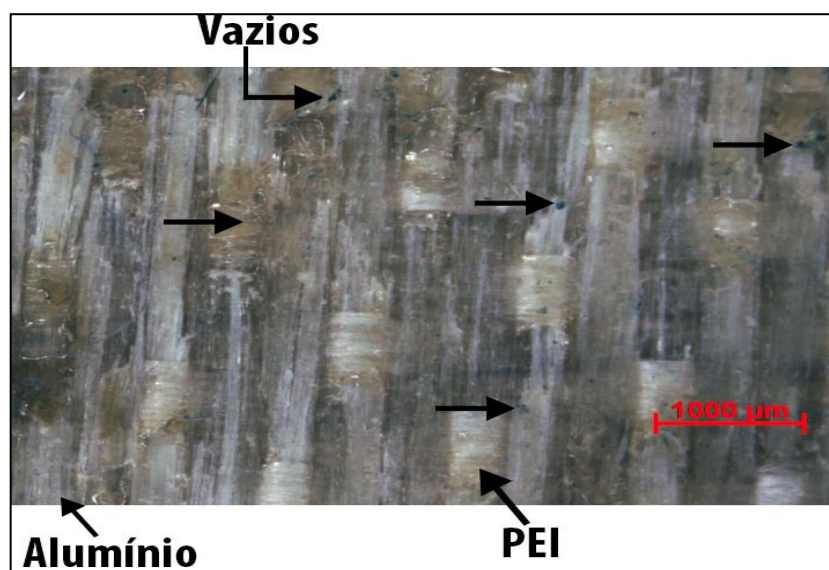
Figura 59 – Análise por macroscopia óptica da liga AA2024-T3 fraturada com o resultado da junção da liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro soldados por laser.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 60 exibe o laminado fraturado, sendo observado também a boa aderência com a liga AA2024-T3, com a formação de pequenos vazios (indicados por setas), decorrentes da solidificação do polímero termoplástico, como evidenciado por Jiao et al. (2017).

Figura 60 – Análise por macroscopia do laminado fraturado com o resultado da união da liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro soldados a laser.



Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.6.2 Influência do processo de soldagem a laser na liga AA2024-T3

Neste trabalho, as soldagens foram realizadas utilizando como princípio a condução térmica. A respeito da soldagem a laser, um feixe é aplicado diretamente a liga AA2024-T3, sendo esta uma liga de excelente condução térmica, a qual é unida a um laminado termoplástico a partir do intertravamento entre eles na região da junta soldada. Sendo o feixe de laser aplicado diretamente a liga, sua estrutura é modificada e suas propriedades podem ser alteradas. Desta forma, o ensaio de dureza foi realizado visando determinar a influência do processo de soldagem a laser na propriedade da dureza deste material. A Tabela 23 apresenta os principais resultados de dureza Vickers obtidos neste trabalho.

Tabela 23 - Resultados provenientes da dureza Vickers para a soldagem a laser Yb: fibra.

| Condição                               | HV            |
|----------------------------------------|---------------|
| Liga AA2024-T3 como recebida           | $140 \pm 1,2$ |
| Liga AA2024-T3 após a soldagem a laser | $114 \pm 2,9$ |

Fonte: Produção do próprio autor.

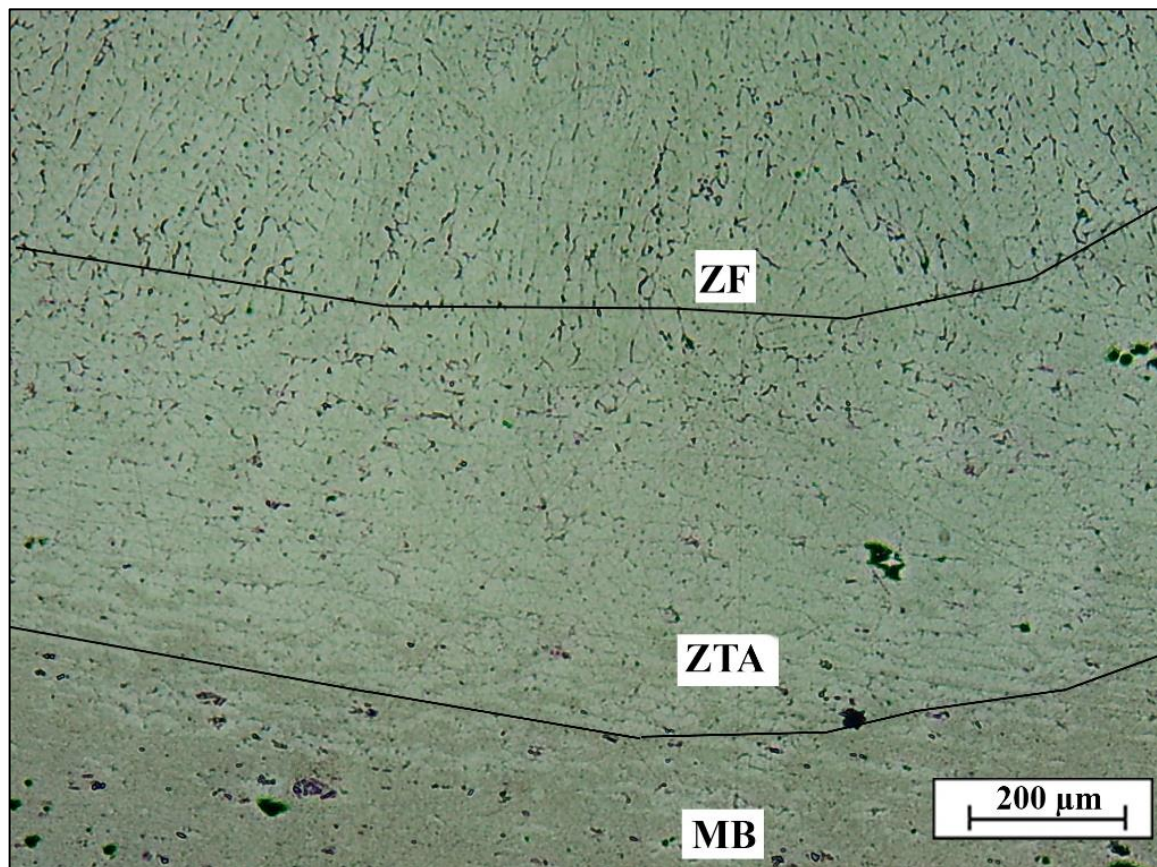
Como pode ser observado, a partir da Tabela 23, o valor de dureza para a liga de alumínio após a soldagem a laser (média de 114 HV) é menor em relação à média do valor obtido no estudo referente a liga como recebida (140 HV). O valor obtido de dureza para o material exposto a soldagem a laser é aproximado aos valores encontrados pela literatura (105-110 HV) (ALFIERI; CAIAZZO; SERGI, 2015).

Devido ao aquecimento durante a operação de soldagem, observa-se o amolecimento do material, tanto na zona fundida (ZF) quanto na zona termicamente afetada (ZTA), já que na ZTA observa-se o superenvelhecimento da liga, com aumento do tamanho médio dos precipitados e perda de coerência com o metal base (MB) e, além disso, na ZF observa-se um fenômeno comparável a recozimento da liga, com segregação de elementos de liga para os contornos de grão e consequente eliminação de precipitados (ALFIERI; CAIAZZO; SERGI, 2015; CAIAZZO et al., 2013). O efeito de perda de resistência foi também relatado por Ahn et al. (2017b) e Wang et al. (2018). Além disso, a perda de elementos voláteis, tais como o magnésio, também contribui para diminuir a dureza da liga AA2024-T3, afetando a estrutura da poça de fusão (AHN et al., 2017a).

Os efeitos acima descritos são também perfeitamente coerentes com os resultados da análise metalográfica realizada (Figuras 61, 62 e 63). Observa-se na Figura 61 três regiões bem

definidas da liga AA2024-T3 pós soldagem: A ZF, a região da qual recebeu o feixe de laser, a zona da ZTA e o metal base (MB).

Figura 61 - Morfologia da liga AA2024-T3 após a soldagem a laser Yb: fibra.

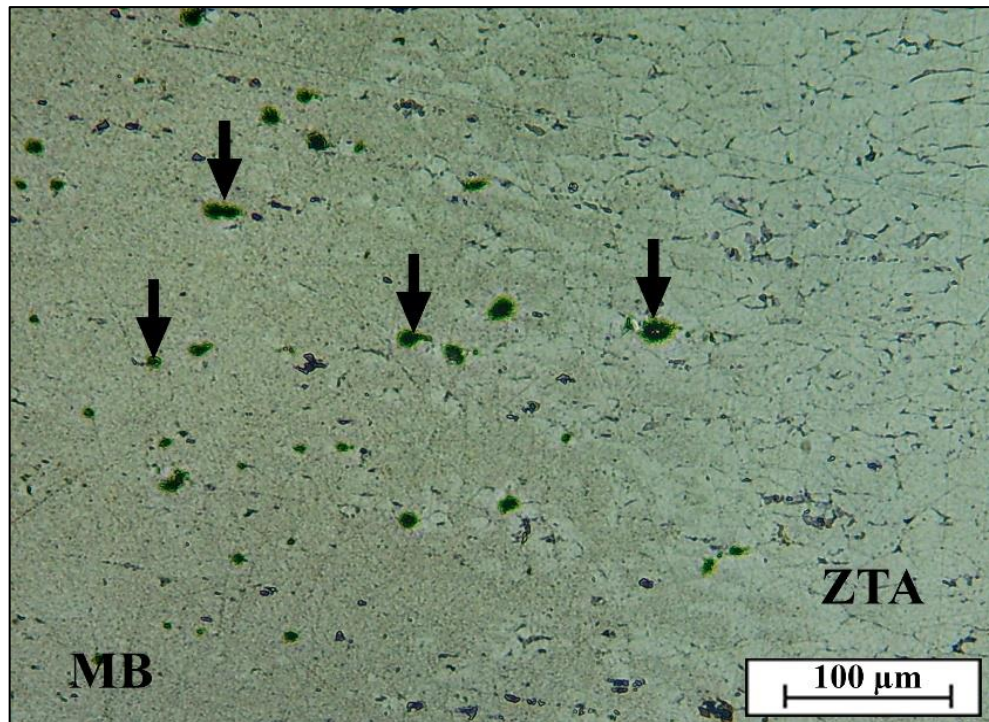


Fonte: Produção do próprio autor.

Nota-se a diferença entre as três zonas citadas. Na zona não exposta ao ciclo térmico de soldagem, MB, não são observados precipitados ou contornos de grão. Apenas são observados grandes pontos atribuídos a corrosão durante a preparação metalográfica. (AHN et al., 2017a; WU et al., 2016).

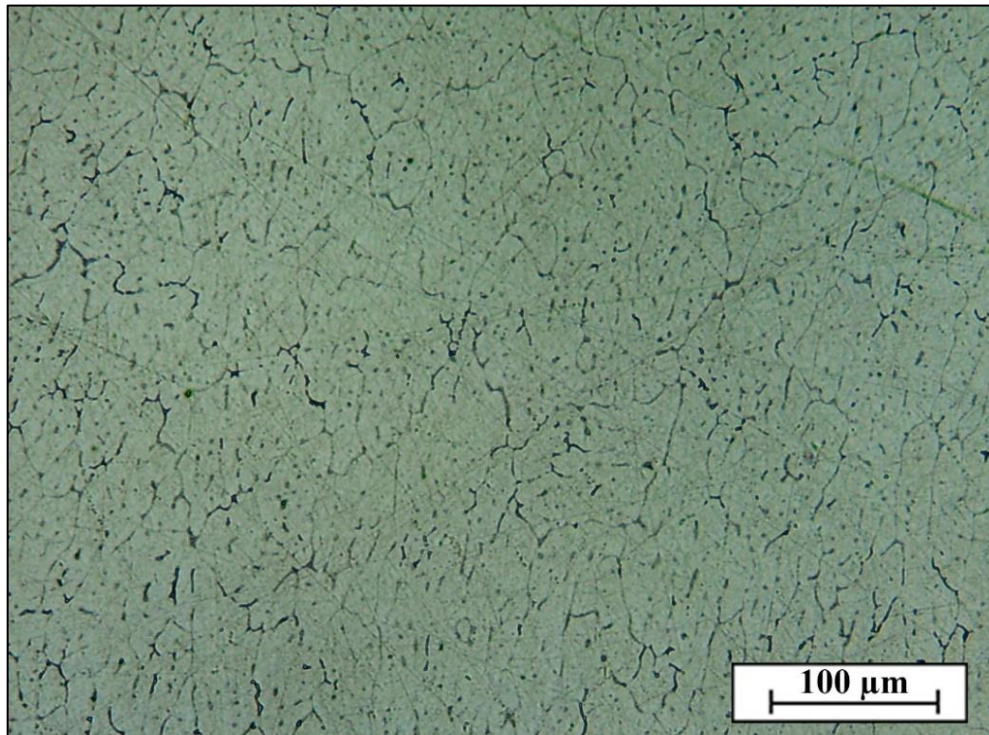
As setas presentes na Figura 62 indicam pontos de corrosão, que são provenientes do ataque químico para revelação dos aspectos microestruturais da liga. Pode-se observar pela Figura 63 a presença de grãos equiaxiais, com contornos de grãos bem definidos, além da presença de segregação de elementos de liga na região.

Figura 62 - Região entre a ZTA e o MB.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 63 - Região da ZTA da liga AA2024-T3 que mostra em detalhes os contornos de grãos presentes.

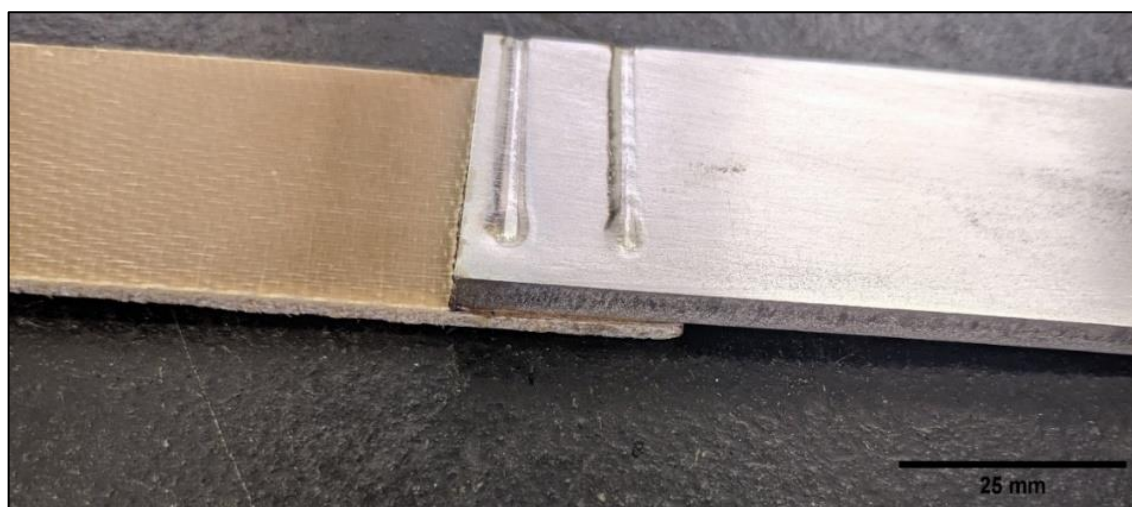


Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.6.3 Otimização do processo de soldagem a laser

Adotando as condições operacionais obtidas a partir do estudo estatístico com os valores otimizados (potência de 1480 W e velocidade de 1,11 mm) e na aplicação da anodização nas ligas AA2024-T3, foi possível otimizar o processo de soldagem a laser. Anteriormente, era aplicado apenas um feixe do laser na superfície da liga AA2024-T3, para ocorrer a transferência de calor na interface da matriz polimérica. Entretanto, com os parâmetros otimizados e aplicados corretamente, foi possível aplicar dois feixes na superfície da liga AA2024-T3 para a união com o laminado, sem prejudicar a qualidade da soldagem. Nesse estudo, o primeiro feixe do laser foi aplicado a 3 mm da borda da liga de alumínio, com uma distância de 10 mm entre os cordões (segundo feixe). A Figura 64 ilustra uma amostra soldada com dois cordões de soldagem a laser.

Figura 64 - Amostra soldada pelo processo a laser Yb: fibra entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 anodizada a partir de dois cordões.



Fonte: Produção do próprio autor.

Como observado na Figura 64, há uma boa interação entre os materiais soldados, sem uma degradação visual aparente. Diante desse resultado, foi realizado o ensaio de LSS com o propósito de comprovar a eficácia desse método de soldagem e, além disso, analisar a efetividade da anodização na liga de alumínio nesse processo de soldagem. Nesse processo, foram soldadas cinco amostras com um cordão, assim como com dois cordões, para efeito de comparação. A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos. Além disso, a Figura 65 ilustra um gráfico de comparação, a partir dos valores apresentados pela Tabela 24, entre os resultados

obtidos de LSS entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 nas três condições de estudo: como recebida, anodizada e otimizada com a aplicação de dois cordões.

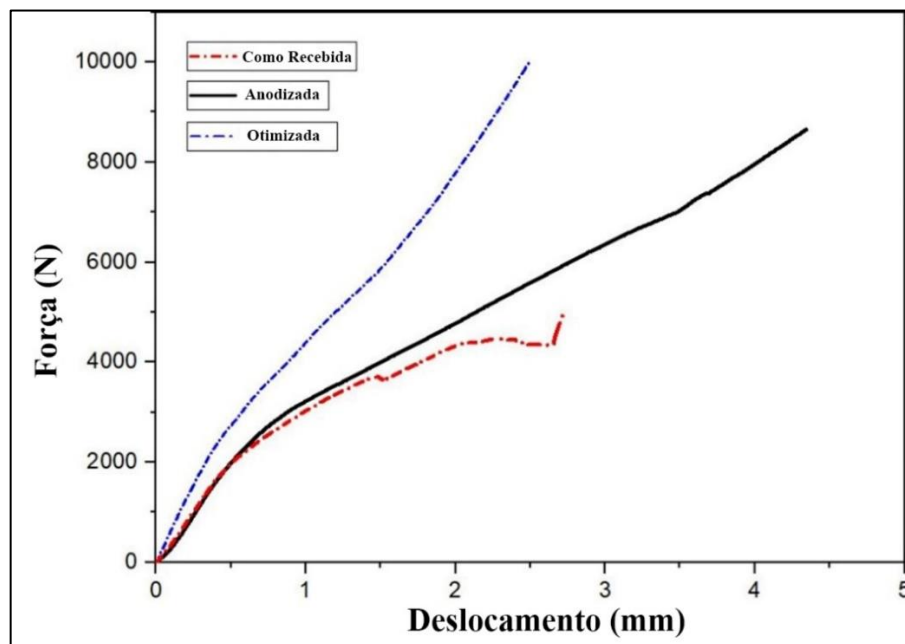
Nos resultados provenientes da Tabela 24 e dos dados informativos da Figura 65, observa-se uma maior média no valor de LSS para a condição de 2 cordões de solda (13,87 MPa) do que para a condição de 1 cordão (10,56 MPa). Além disso, um valor máximo obtido de 16,02 MPa foi produzido com a condição de aplicação de dois feixes de laser, consolidando a efetividade da aplicação dessa otimização do processo. Essa análise determinou, também, que o processo de anodização foi efetivo no aumento da interação entre o laminado e a liga de alumínio, sendo o maior valor obtido a partir da união do compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 não anodizada (8,06 MPa) foi menor que o valor obtido na liga anodizada (13,85 MPa).

Tabela 24 - Resultado proveniente da otimização do processo a laser Yb: fibra. Para condições de um e dois cordões de solda.

| <b>Amostra</b> | <b>Condição</b> | <b>LSS (MPa)</b> |
|----------------|-----------------|------------------|
| 1              | 1 cordão        | 9,34             |
| 2              | 1 cordão        | 7,24             |
| 3              | 1 cordão        | 13,85            |
| 4              | 1 cordão        | 13,49            |
| 5              | 1 cordão        | 8,90             |
| <b>Média</b>   | -               | <b>10,56</b>     |
| 6              | 2 cordões       | 16,02            |
| 7              | 2 cordões       | 15,80            |
| 8              | 2 cordões       | 8,42             |
| 9              | 2 cordões       | 14,06            |
| 10             | 2 cordões       | 15,05            |
| <b>Média</b>   | -               | <b>13,87</b>     |

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 65 - Gráfico Força x Deslocamento obtido a partir do ensaio LSS nas condições da liga AA2024-T3: como recebida, anodizada e otimizada (a partir da anodização e aplicação de dois feixes de laser).



Fonte: Produção do próprio autor.

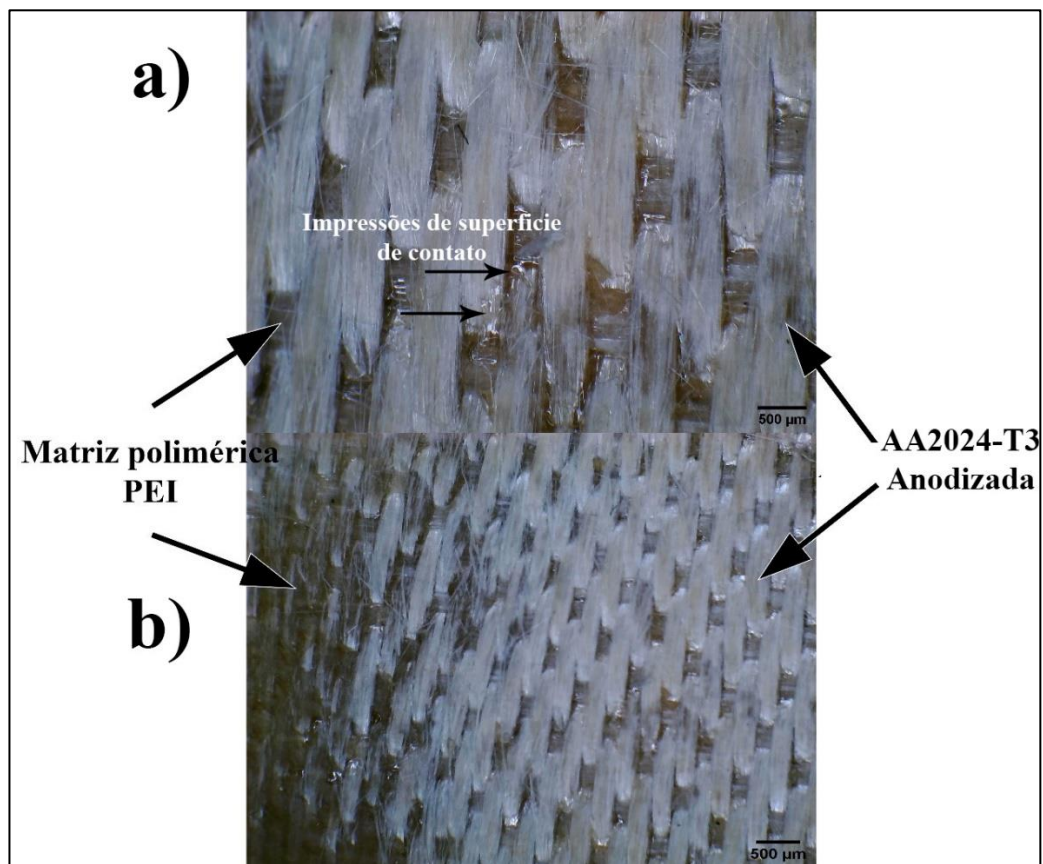
#### 4.6.4 Caracterização da união entre o laminado e a liga pelo processo a laser

Para uma melhor consolidação do efeito da otimização no processo e uma análise mais criteriosa a partir da região soldada dos materiais envolvidos, foram realizadas análises por estereoscopia e microscopia óptica.

A Figura 66 ilustra a macroscopia realizada em uma das amostras que foram expostas a dois cordões de solda. Já na Figura 67 é apresentada a amostra soldada na melhor condição de soldagem a laser entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 não anodizada.

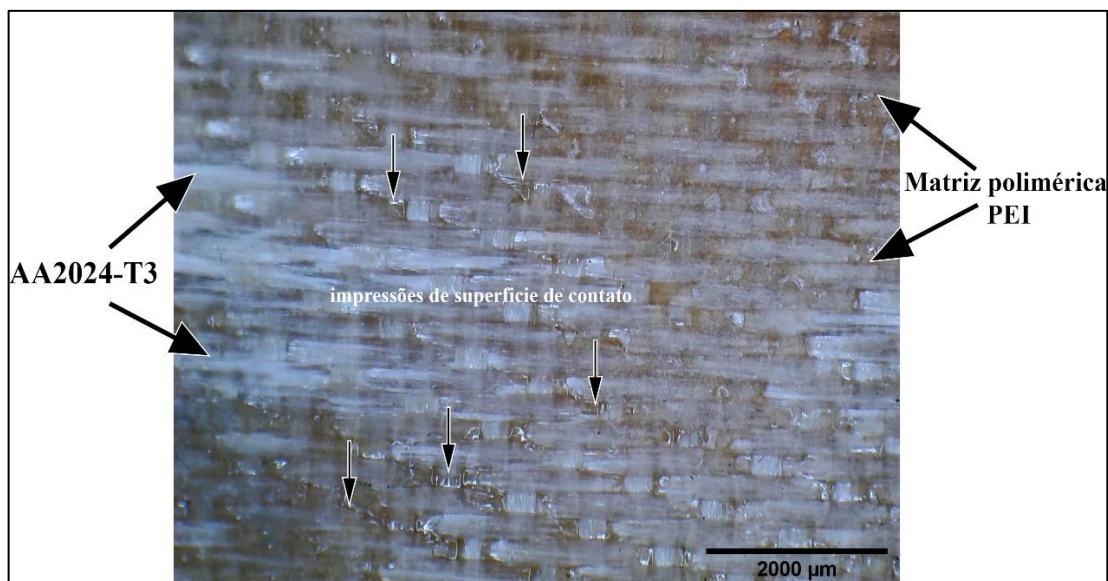
Comparando-se as Figuras 66 e 67, é observado que na amostra fraturada da liga AA2024-T3 anodizada apresenta um melhor intertravamento (ancoragem) com o laminado, revelando um aspecto mais forte e uniforme de interação com a matriz polimérica. Já para a amostra não anodizada, observa-se um aspecto mais fraco da liga na interação com o laminado, apresentando regiões com fracas impregnações.

Figura 66 - Interação da matriz polimérica PEI com a liga AA2024-T3 anodizada após a fratura por LSS: a) ampliação de 1,6x; b) ampliação de 0,65x.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 67 – Análise por macroscopia da soldagem entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 não anodizada (ampliação de 0,65x).

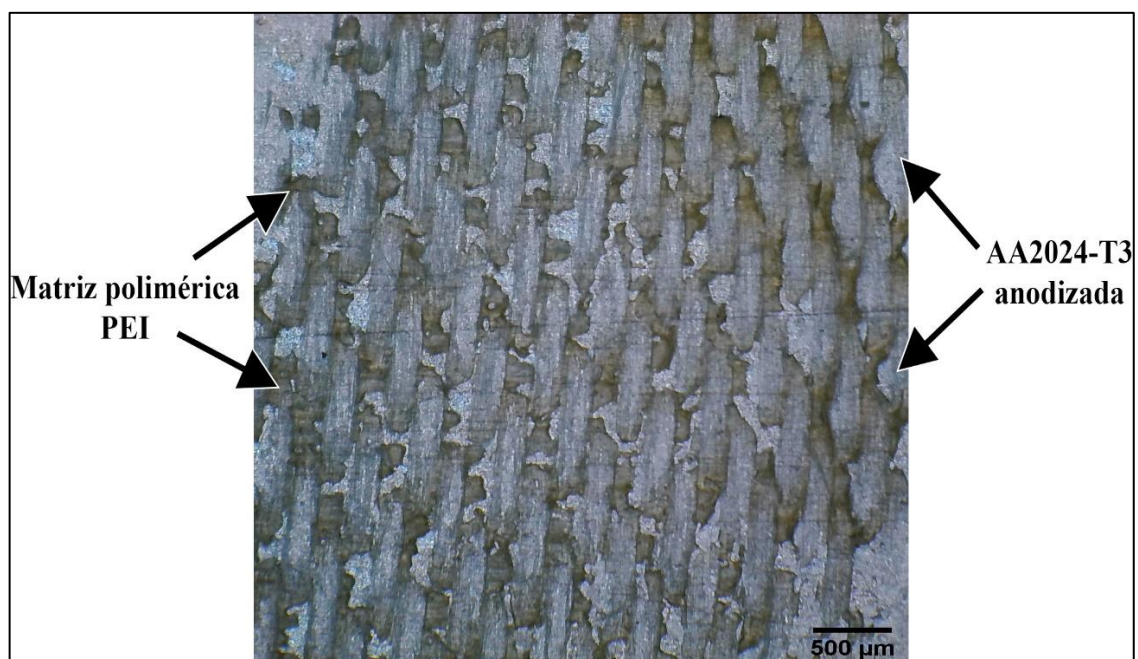


Fonte: Produção do próprio autor.

Além disso, em ambas as figuras é destacado a presença de impressões de superfície de contato. Esse fenômeno indica um menor grau de interação entre as interfaces, apresentando um aspecto de maior brilho correspondendo a uma menor impregnação da matriz polimérica (BARBOSA et al., 2018). Quanto menor o valor obtido nos ensaios mecânicos, maior a presença desse aspecto visual nas regiões soldadas do material. Este comportamento pode ser observado na Figura 67, onde uma maior presença dessa condição está presente nas amostras soldadas sem anodização quando comparada a liga anodizada (Figura 66), e isso refletiu nos valores de LSS obtidos (7,35 MPa e 13,87 MPa, respectivamente). A Figura 68 apresenta a macroscopia realizada na amostra fraturada da soldagem entre o compósito PEI/fibra de vidro e a liga AA2024-T3 anodizada, em que se obteve o maior valor de LSS apresentado pela Tabela 24 (16,02 MPa).

Observa-se na Figura 68 uma excelente interação entre o laminado e a liga AA2024-T3 anodizada, apresentando um aspecto uniforme nas regiões de interação com o laminado, sem a presença de impressões de superfície de contato. A partir da análise realizada, é comprovada a eficácia do tratamento da anodização na liga AA2024-T3, visando um maior intertravamento entre as juntas dissimilares, obtendo-se maiores valores de resistência e interação com a matriz polimérica PEI.

Figura 68 – Análise por macroscopia da amostra fraturada com o maior valor de LSS (ampliação de 0,65x).

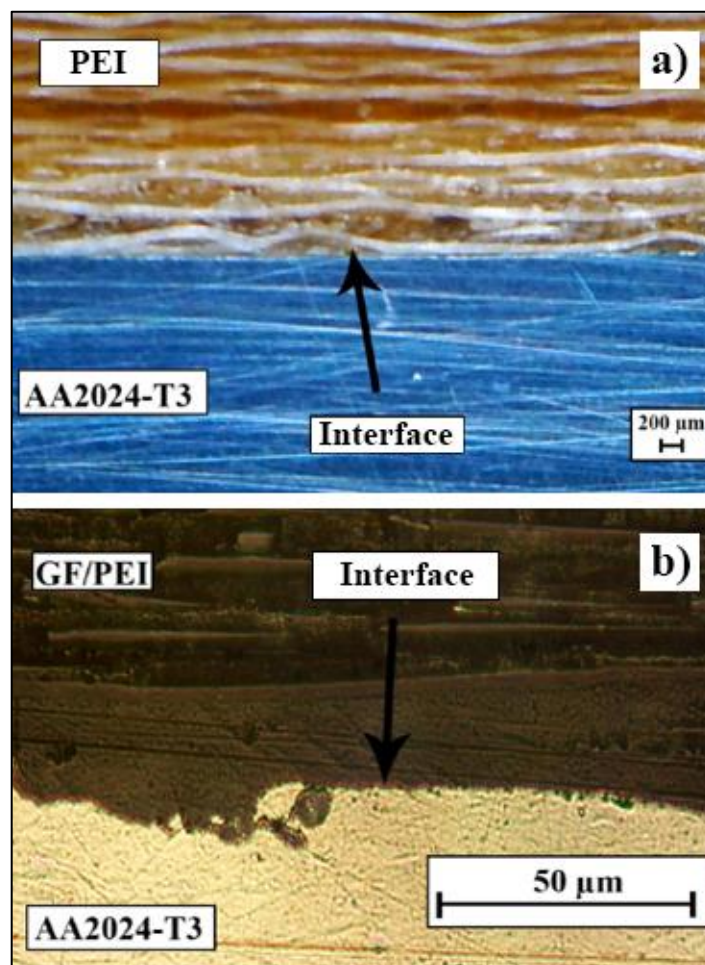


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 69 apresenta a interface soldada dos materiais em estudo a partir da otimização realizada do processo a laser. Na região da interface, observa-se a interação dos materiais a partir do intertravamento, sendo esta uma região sem a presença de delaminações ou vazios que pudessem interferir na qualidade da união.

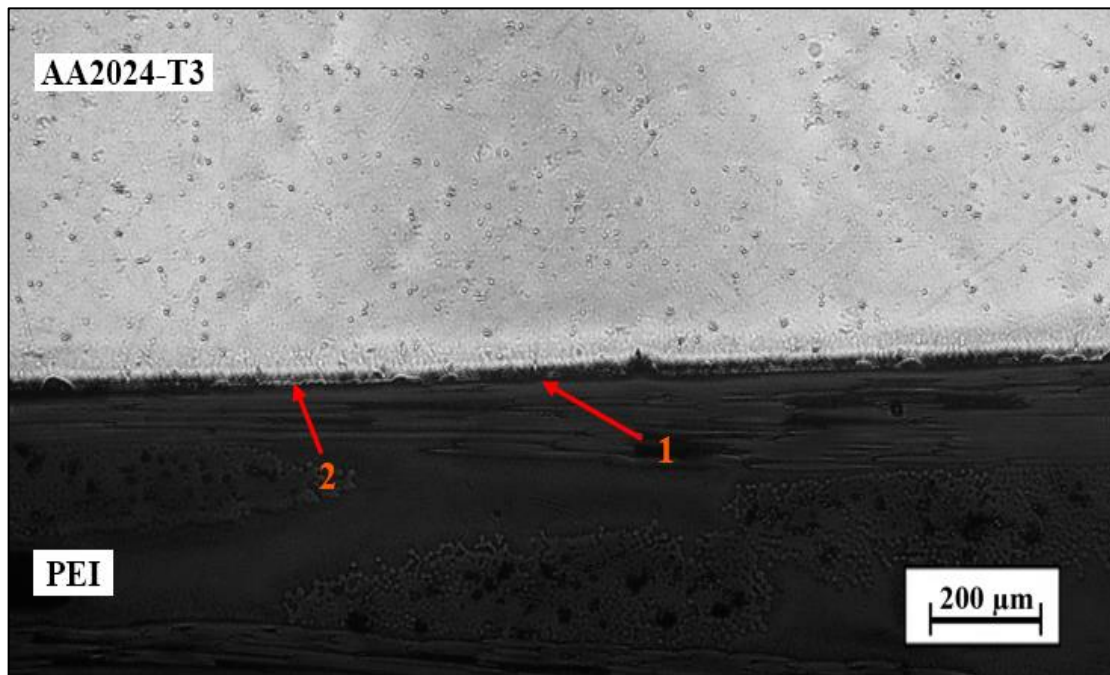
Já a Figura 70 apresenta a microscopia de uma amostra soldada por laser a partir de um cordão de solda, onde: 1 é a interface e 2 é a interação entre a liga AA2024-T3 anodizada e o compósito PEI/fibra de vidro. Observa-se na região de interface que não há uma regularidade na união entre os dois materiais, sendo a interação entre eles não sendo muito efetivo, ilustrando uma fraca interação entre os materiais, como demonstrado na Figura 70 e, além disso, a partir dessa análise, a condução do calor a partir da soldagem a laser, se comparado a soldagem de dois cordões de solda, se tornou mais fraca e menos efetiva, sendo esse aspecto demonstrado na Figura 70, explicando o menor valor de LSS obtido.

Figura 69 - Região da interface a partir da otimização entre o AA2024-T3 anodizado e o compósito PEI/fibra de vidro: a) ampliação de 0,65x; b) ampliação de 15x.



Fonte: Produção do próprio autor.

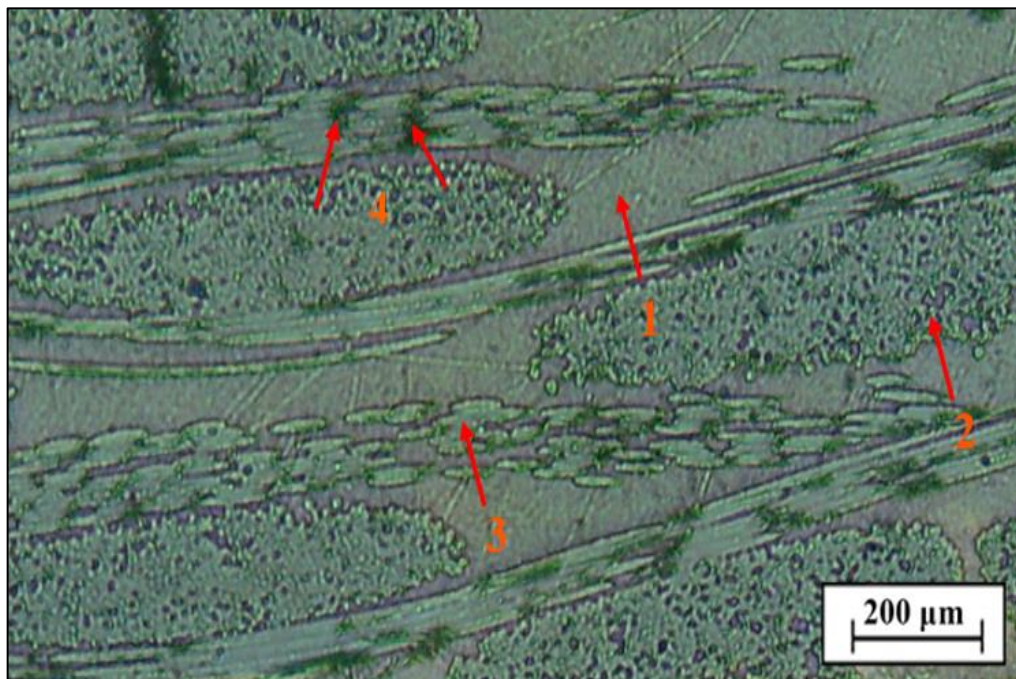
Figura 70 – Morfologia da amostra soldada por um cordão de solda: fraco intertravamento na interface soldada (ampliação de 5x).



Fonte: Produção do próprio autor.

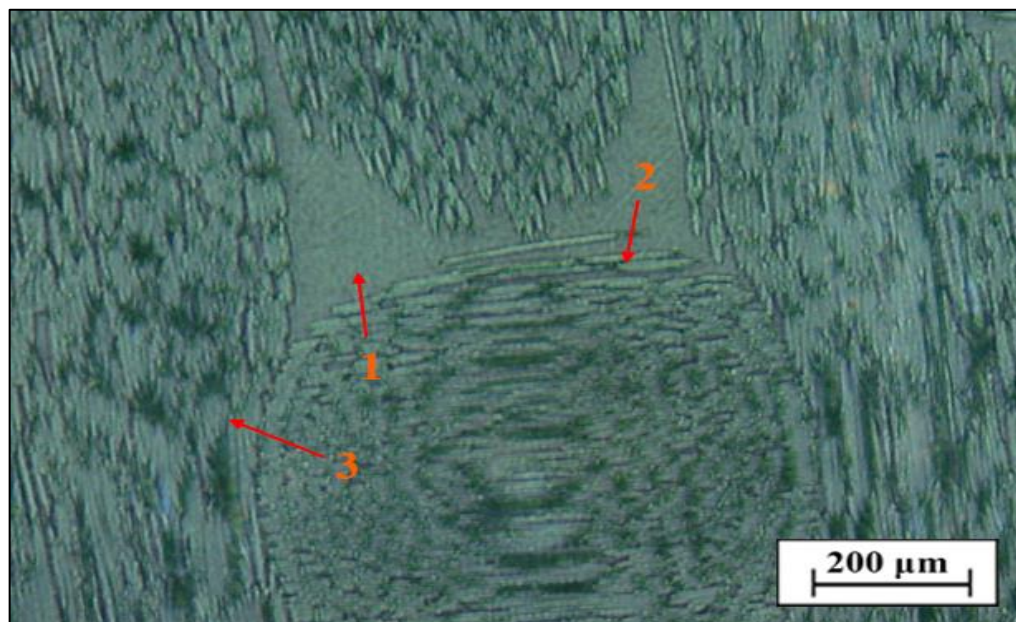
A Figura 71 ilustra a morfologia do compósito PEI/fibra de vidro após a soldagem a laser por dois cordões. Como pode ser observado, a estrutura do material não apresentou mudanças significativas, sem presença de defeitos que pudessem interferir nas propriedades do material. Na Figura 71 alguns detalhes são apresentados onde: 1 é a matriz polimérica PEI, 2 são as fibras no sentido transversal, 3 são as fibras no sentido longitudinal e 4 são pontos em que ocorreram uma maior solidificação da matriz polimérica PEI, efeitos estes oriundos de uma maior concentração e condução de calor do processo a laser, efeitos estes relatados também por Barbosa et al. (2018). A Figura 72 apresenta a morfologia do laminado na mesma condição como descrito anteriormente, porém em outra região do material, com o intuito de reforçar a eficácia do processo de soldagem a laser, sem alteração das propriedades e morfologias do laminado. Onde 1 é matriz polimérica PEI, 2 são as fibras no sentido transversal e 3 são as fibras no sentido longitudinal.

Figura 71 - Morfologia do compósito PEI/fibra de vidro após a soldagem a laser, com alguns pontos de solidificação da matriz termoplástica (ampliação de 5x).



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 72 - Morfologia do compósito PEI/fibra de vidro após a soldagem a laser (ampliação de 5x).



Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.7 ANÁLISE POTENCIODINÂMICA

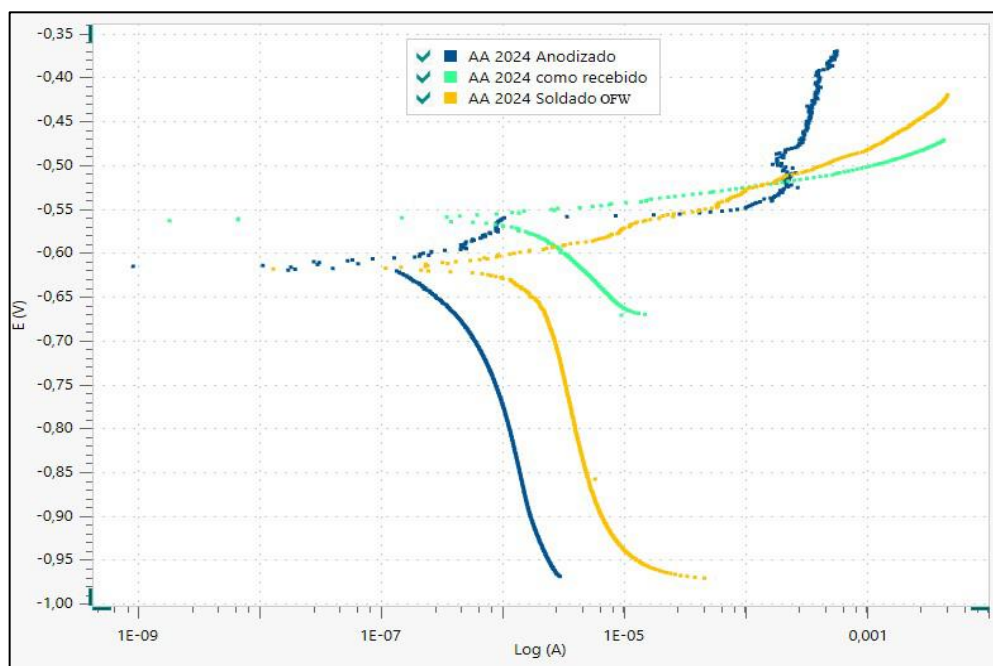
A abordagem de uma junção entre dois materiais dissimilares fornece a possibilidade de uma união que agregue elevados valores de resistência mecânica e rigidez, com baixa massa específica e sem a necessidade de um terceiro material que fique permanente na junta após o processo de soldagem (LIONETTO et al., 2018b; REIS et al., 2018).

Embora o desejo de unir um metal e um compósito, que possuem propriedades físico-químicas tão divergentes pareça ser um grande desafio, já foram desenvolvidos estudos que comprovam o sucesso desse processo utilizando as técnicas de soldagem. Porém, quando se trata de materiais com potenciais muito distintos, pode-se ter problemas de aplicação referentes a formação de par galvânico e consequentemente a corrosão (ALEXOPOULOS et al., 2016). Visto isto, foi realizado uma análise da influência dos processos de soldagem por OFW e a laser na resistência a corrosão da liga AA2024-T3. Desta forma, foram analisadas três condições da liga: como recebida, anodizada e após a soldagem por OFW e a laser. As Figuras 73 e 74 apresentam os resultados encontrados neste trabalho.

Como pode ser observado na Figura 73, é notável que a liga AA2024-T3 no estado de como recebida apresentou um potencial de corrosão maior (-0,56 V) quando comparado ao material soldado por OFW e ao apenas anodizado, que apresentaram potenciais de corrosão similares (-0,61 V). Observou-se, também, que a liga anodizada apresentou menor densidade de corrente de corrosão ( $1,1 \mu\text{A/cm}^2$ ), enquanto os materiais como recebidos e soldados por OFW apresentaram valores aproximados ( $8,1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  e  $9,3 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , respectivamente), indicando assim que o material anodizado possui uma maior resistência a corrosão. O aumento da densidade de corrente de corrosão do material após a soldagem pode ser atribuído à remoção de parte do óxido, durante o processo e a limpeza para remoção de resíduos de polímero, na região de solda.

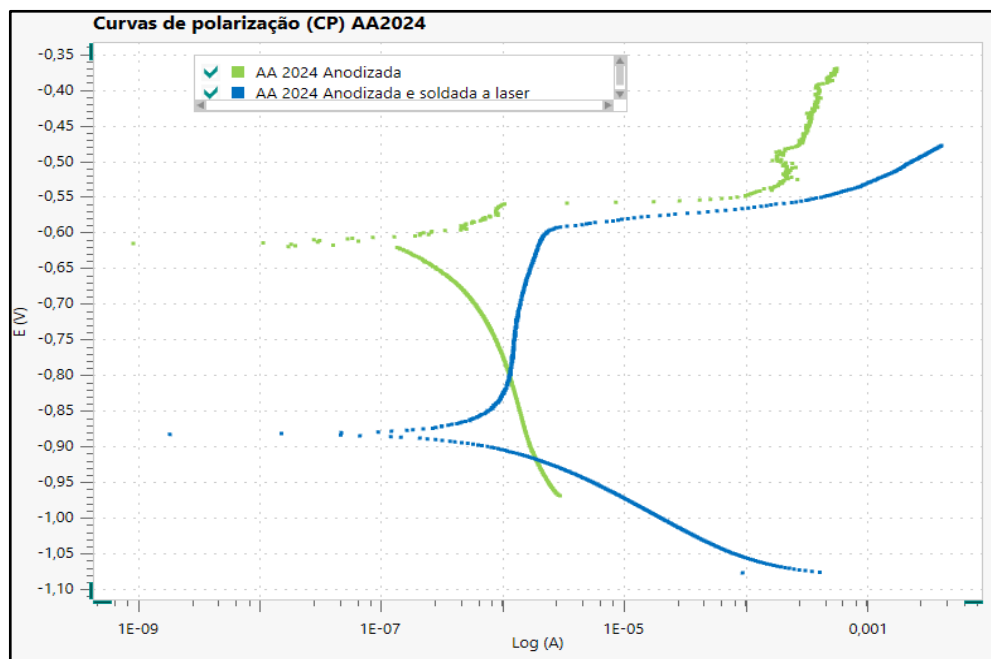
Esse óxido de alumínio formado naturalmente na superfície do metal, sendo essa formação oriunda do próprio produto de corrosão, pode ser chamado de passivação. Esse evento tem como consequência a modificação do potencial da superfície do alumínio ficando com menor atividade, ou seja, o potencial passa a ter um valor mais positivo e assim, será mais nobre e, consequentemente, causando uma proteção natural contra a corrosão (ALVES, 2012).

Figura 73 - Curvas de polarização da liga AA2024-T3 como recebida, anodizada e após a soldagem pelo processo OFW.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 74 - Curvas de polarização da liga AA2024-T3 anodizada e após a soldagem pelo processo a laser.



Fonte: Produção do próprio autor.

Já no gráfico da Figura 74, verifica-se que a amostra soldada a laser apresentou um potencial de corrosão mais negativo (-0,88 V) que a liga de alumínio anodizada (-0,61 V), como resultado da formação de uma camada passiva sendo esta rompida a aproximadamente -0,60 V. No entanto, para a liga anodizada o intervalo de potenciais de passivação é pequeno ( $\Delta E_{\text{pass}} = 0,06$  V). Já, após a soldagem a laser, esse intervalo de passivação é ampliado em cerca de cinco vezes ( $\Delta E_{\text{pass}} = 0,28$  V), o que indica um aumento significativo na proteção oferecida pelo óxido formado. Observou-se, também, que a liga anodizada apresentou o mesmo valor de densidade de corrente ( $1,2 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>) obtido anteriormente e apresentado pela Figura 73. Um valor de  $3,39 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> de densidade de corrente foi obtido para a amostra soldada a laser.

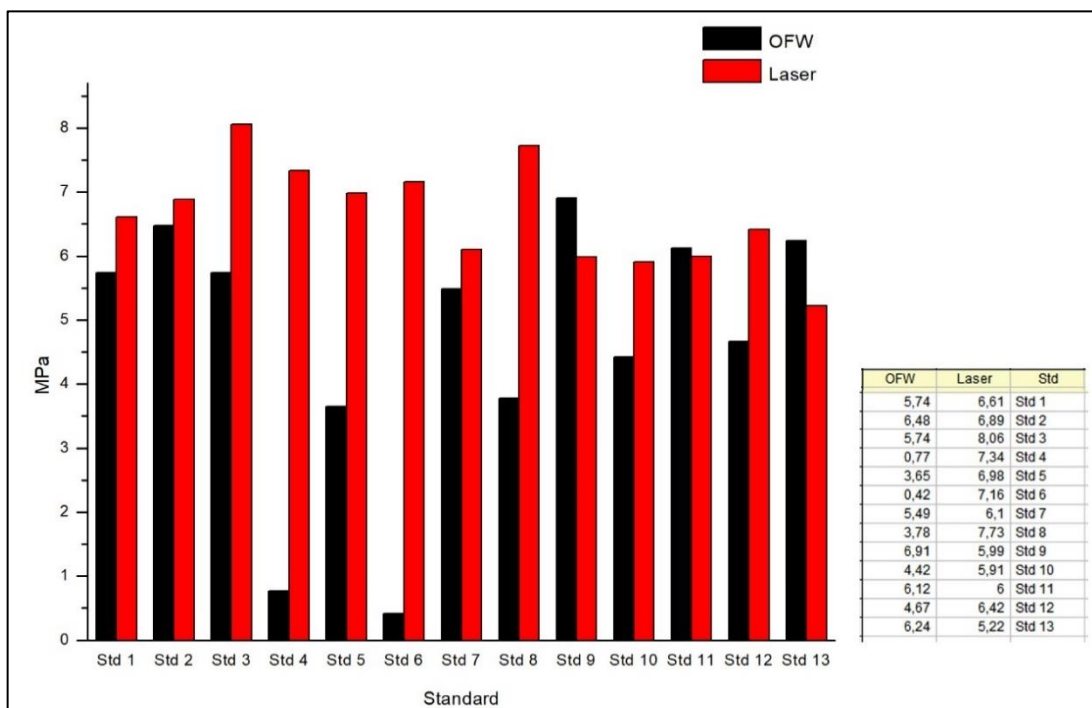
#### 4.8 COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM DE ESTUDO

Após a obtenção dos resultados, foi realizado um estudo com o intuito de comparar os dois processos utilizados de soldagem para a união da liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro. Primeiramente, em relação ao estudo estatístico, a Figura 75 ilustra um gráfico comparando os resultados obtidos por esse planejamento estatístico.

Observa-se, a partir da Figura 75, que a soldagem a laser apresentou maiores valores de LSS e possui uma menor variância se comparado a soldagem por OFW. Isso pode ser explicado pela aplicação do processo, onde a soldagem a laser é uma soldagem que concentra um maior aquecimento em um único ponto, enquanto a soldagem por OFW tem um maior espalhamento de aquecimento a partir de sua chama GLP, fazendo com que ocorra essa maior variância nos resultados de LSS para a soldagem por OFW. Além disso, o máximo valor obtido para o laser foi de 8,06 MPa e para o OFW foi de 6,91 MPa.

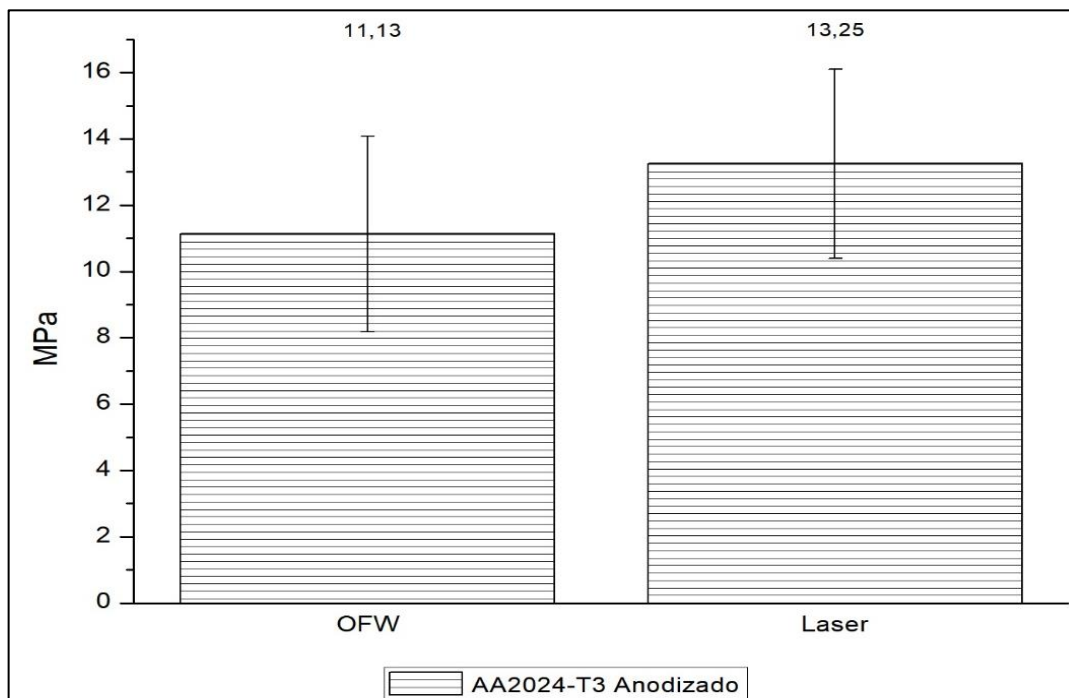
Já a Figura 76, apresenta um gráfico comparando os valores de LSS obtidos para ambos os processos após a otimização dos parâmetros e com a liga anodizada. Na soldagem a laser, obteve-se um valor máximo de 16,02 MPa e uma maior média foi obtida (13,25 MPa) em comparação a soldagem por OFW (11,13 MPa). Além disso, o máximo valor obtido por OFW foi de 13,80 MPa.

Figura 75 - Gráfico com os resultados de LSS para ambos os processos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 76 – Comparação dos valores de LSS obtidos para ambos os processos após a otimização dos parâmetros de soldagem e com a liga anodizada.

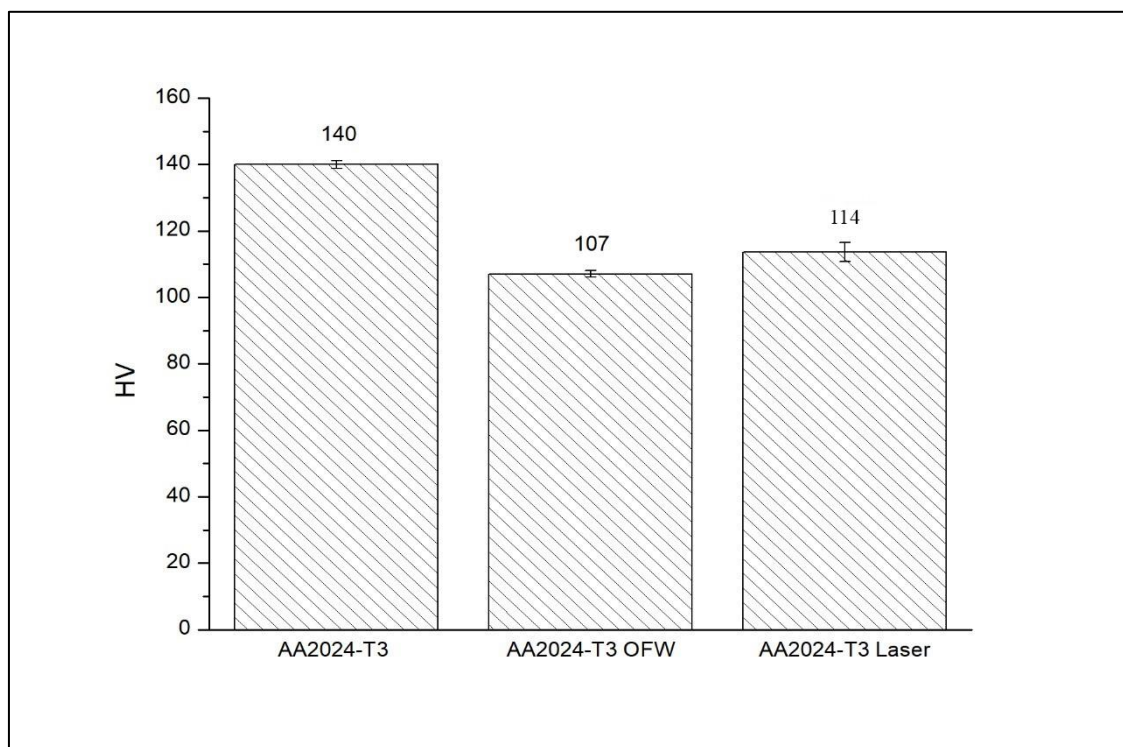


Fonte: Produção do próprio autor.

Em relação a influência de ambos os processos nas propriedades da liga AA2024-T3, a Figura 77 ilustra o resultado de microdureza na amostra. Pode-se observar que não houve mudanças significativas de dureza em relação a liga AA2024-T3 soldada em ambos os processos. Entretanto, em comparação a liga como recebida, o valor de dureza é reduzido, havendo uma alteração do estado metalúrgico do metal. Esse valor reduzido era esperado, pois o aquecimento da liga proveniente de ambos os processos, eliminou os efeitos da resistência obtida pelo tratamento térmico de solubilização e envelhecimento da liga, formando grandes partículas de segunda fase que não tem mais efeito sobre a resistência do material.

Em relação ao compósito PEI/fibra de vidro, com a aplicação correta dos parâmetros e a devida proteção dos laminados, ambos os processos não degradaram de maneira prejudicial a matriz polimérica e não alteraram suas propriedades térmicas, sendo isso confirmado pela análise de TGA e da microestrutura obtida no estudo.

Figura 77 –Comparação dos valores de microdureza obtidas no estudo.



Fonte: Produção do próprio autor.

## 5 CONCLUSÃO

Baseando-se nos resultados encontrados nesse estudo, são apresentadas as seguintes conclusões:

A aplicação do planejamento experimental para otimização e aplicação correta dos parâmetros dos processos de soldagem por OFW e a laser Yb: fibra foi efetiva, apresentando um valor de  $R^2$  de 81,12% e 88,05%, respectivamente, que pode ser explicada pelo modelo quadrático relativo à variável resposta LSS. Os valores de LSS obtidos experimentalmente para a soldagem por OFW foram entre 0,42 MPa e 6,91 MPa. Já para a soldagem a laser, a faixa de valores de LSS obtida experimentalmente foi entre 5,22 MPa e 8,06 MPa. Foi possível, ainda, compor com base aos resultados obtidos, modelos estatísticos característicos da soldagem estudada com o qual se obteve a indicação de valores otimizados fornecidos a partir do programa estatístico *design express*. Os parâmetros otimizados para a união entre a liga AA2024-T3 e compósito PEI/fibra de vidro, a partir do processo de soldagem por OFW, foram: 107 segundos de aplicação da chama GLP e 30 milímetros de distância da tocha ao material. Já para a soldagem a laser foram: potência de 1480 Watts e velocidade de 1,11 milímetros por segundo. Com os parâmetros otimizados, para a soldagem por OFW foi obtido um valor de LSS de 6,32 MPa. Já para a soldagem a laser chegou-se a 8,06 MPa.

Sobre o material compósito, a partir da análise por TGA, o processo de decomposição térmica da matriz de PEI ocorre em uma única etapa de decomposição confirmado pela presença de apenas um pico na DTG. Em todas as condições do compósito PEI/fibra de vidro a reação térmica ocorre em uma faixa estreita de temperatura, ocorrendo o início da decomposição termo-oxidativa em aproximadamente 470°C, 440°C e 520°C para o compósito como recebido; para o compósito após a soldagem por OFW e para o compósito após a soldagem a laser Yb: fibra, respectivamente. Além disso, foi constatado que, com a devida proteção do laminado durante o processo, obtém-se juntas de boa qualidade, sem a presença de vazios ou delaminações que pudessem afetar a interface soldada, sendo isso constatado com a análise da morfologia do material para ambos os processos. A melhor aplicação dos parâmetros de soldagem e otimização do processo, evita-se a presença de impressões de superfície presentes em juntas de baixa qualidade, que interferem na interação entre a matriz polimérica e a liga AA2024-T3 na interface soldada.

Em relação ao processo de anodização realizada na liga AA2024-T3, o objetivo foi melhorar o intertravamento entre os materiais dissimilares, a partir da conversão da superfície

de alumínio em óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), formando uma camada anódica, resultados estes foram constatados pelo maior valor de LSS obtidos para ambos os processos de soldagem. Além disso, a anodização acelera a formação do óxido de alumínio sobre o metal base, melhorando sua resistência à corrosão e revestimento. E isso foi constatado na análise potenciodinâmica, onde a liga anodizada apresentou menor densidade de corrente de corrosão ( $1,2 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ), em relação a liga como recebida ( $8,1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ) e após a soldagem por OFW ( $9,3 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ) e a laser ( $3,39 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ), sendo comprovada a eficiência da anodização, não só da melhora do intertravamento na interface soldada com o laminado, como também ao aumento da resistência da liga à corrosão.

Em ambos os processos foram constatadas mudanças na liga AA024-T3 em razão de sua microestrutura e dureza. A presença de grãos alongados presentes na liga AA2024-T3 como recebida são convertidos em uma nova estrutura de grãos equiaxiais, a partir da recristalização e crescimento dos grãos, devido a exposição da liga frente ao aquecimento dos processos. A partir dos resultados do ensaio de dureza, um valor de 140 HV foi obtido para a liga como recebida e com a redução desses valores de 107 HV e 114 HV para a soldagem OFW e a laser, respectivamente. Essa redução pode ser explicada por dois motivos: (1) quando a liga é exposta à altas temperaturas, devido ao recozimento, a resistência obtida (a partir do tratamento térmico de solubilização) é perdida e causa essa redução na dureza; (2) O que determina as propriedades nessa liga envelhecida são precipitados do tamanho nanométrico. Os elementos de liga que estavam formando esses precipitados do tamanho nanométrico são segregados e formam dispersóides com um tamanho muito maior e que não tem mais efeitos sobre a microestrutura, ocasionando essa redução de dureza.

Finalmente, com a aplicação correta dos parâmetros, a soldagem a laser por condução térmica foi obtida e, a partir da análise da microestrutura e o resultado de LSS, foi observado um melhor intertravamento entre a liga AA2024-T3 e o compósito PEI/fibra de vidro, sem a presença evidente de defeitos na interface e, conseqüentemente, foi possível a otimização do processo, aplicando-se dois cordões na região do laminado, sendo verificado uma maior eficiência no intertravamento entre os materiais soldados, sem presença de degradação.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) para melhor aprofundamento e identificação das partículas segregadas observadas após soldagem;
- Aprimoramento do processo de anodização, utilizando-se a técnica de planejamento experimental ou aplicação da anodização por outras técnicas, tal como deposição a plasma;
- Estudo aprofundado da interação entre o metal/polímero, a partir de cálculos e conceitos que envolvem essa interface, tais como: ligação química, difusão, mecanismos de fratura e de junção;
- Otimização do dispositivo de soldagem para a junção metal/polímero;
- Um estudo da utilização dos processos de soldagem por OFW e a laser para a soldagem entre metal/polímero em estruturas com geometrias próximas as aplicadas industrialmente.

## 5.2 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS GERADAS

- **“Avaliação da Soldagem GLP para a Junção Híbrida do Compósito PEI/fibra de vidro e Alumínio 2024”**, apresentado no IV Congress of Industrial Management and Aeronautical Technology, São José dos Campos/SP, 2017.
- **“Estudo da Soldagem por Oxi-Combustível (OCW) para A junção Híbrida de Compósito PEI/fibra de vidro e alumínio 2024”**, apresentado no V Congress of Industrial Management and Aeronautical Technology, São José dos Campos/SP, 2018.
- Artigo cujo intitulado **“Development of Oxyacetylene Welding Process for PEI/Fiber Glass Laminates”**, foi aceito para publicação na revista “Welding Journal”, ISSN: 0043-2296, com previsão de publicação para maio/junho de 2021.
- Artigo cujo intitulado **“Feasibility Study of the Oxy Fuel Gas Welding (OFW) Process in AA2024-T3 and GF/PEI Composite Hybrid Joint”**, está em processo de revisão pela revista “Welding in the World”, ISSN: 0043-2288.

## REFERÊNCIAS

- ABIBE, A. B. et al. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer-metal staked joints. **Materials and Design**, [s. l.], v. 46, p. 338–347, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.043>>.
- ABIBE, A. B. et al. On the feasibility of a friction-based staking joining method for polymer – metal hybrid structures. **Materials & Design**, [s. l.], v. 92, p. 632–642, 2016.
- ABRAHÃO, Ana Beatriz Ramos Moreira. **Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos pei/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas**. 2015. 200 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação Engenharia Mecânica, Materiais e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- AGEORGES, C.; YE, L. Resistance welding of metal/thermoplastic composite joints. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 449–475, 2001.
- AHAMAD, Hoomam et al. Effect of temperature on mechanical behavior of hot air welded poly (methyl methacrylate) . **International Journal of Technical Research and Applications**, [s. l.], v. 4, n. May, p. 215–219, 2016.
- AHMED, T. J. Induction welding of thermoplastic composites — an overview. [s. l.], v. 37, p. 1638–1651, 2006.
- AHN, J. et al. Effect of filler metal feed rate and composition on microstructure and mechanical properties of fibre laser welded AA 2024-T3. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 25, p. 26–36, 2017. a.
- AHN, J. et al. The effect of Ar and He shielding gas on fibre laser weld shape and microstructure in AA 2024-T3. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 29, p. 62–73, 2017. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.011>>.
- 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. April, p. 70–85, 2018.
- ALBIERO, Daniel et al. Gráficos de probabilidade normal para avaliação de mecanismos de distribuição de sementes em semeadoras. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 507–518, 2012.
- ALEXOPOULOS, Nikolaos D. et al. The effect of artificial ageing heat treatments on the corrosion-induced hydrogen embrittlement of 2024 (Al-Cu) aluminium alloy. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 102, p. 413–424, 2016.
- ALFIERI, Vittorio; CAIAZZO, Fabrizia; SERGI, Vincenzo. Autogenous laser welding of AA 2024 aluminium alloy: Process issues and bead features. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 33, p. 406–411, 2015.

ALTABEY, Wael; NOORI, Mohammad. An Extensive Overview of Lamb Wave Technique for Detecting Fatigue Damage in Composite Structures. **Industrial and Systems Engineering**, [s. l.], v. 2, n. June, p. 1–20, 2017.

ALVES, Guilherme José Turcatel. **nonocoloração de ligas de alumínio**. 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado). Pós-graduação em Química Aplicada, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2012.

AMANCIO-FILHO, S. T. et al. Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: Influence of rotation speed. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 93, n. 8, p. 1529–1538, 2008.

AMEND, P.; PFINDEL, S.; SCHMIDT, M. Thermal joining of thermoplastic metal hybrids by means of mono- and polychromatic radiation. **Physics Procedia**, [s. l.], v. 41, p. 98–105, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.056>>.

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. a.

ANDRÉ, Natália M. et al. Influência da espessura do filme polimérico intermediário na resistência mecânica de juntas híbridas de alumínio 2024-T3 e CF-PPS Produzidas Por União Pontual Por Fricção. **Soldagem e Inspecao**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 2–15, 2016. b.

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.

ARENAS, José M. et al. Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium-composite material bonding. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 417–423, 2013.

ASHWATH, P. et al. Processing and characterization of extruded 2024 series of aluminum alloy. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 12479–12483, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.228>>.

BALLE, Frank; WAGNER, Guntram; EIFLER, Dietmar. Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites. **Advanced Engineering Materials**, [s. l.], v. 11, n. 1–2, p. 35–39, 2009.

BARBOSA, Lorena Cristina Miranda et al. Fractographic study of welded joints of carbon fiber/PPS composites tested in lap shear. **Engineering Failure Analysis**, [s. l.], v. 93, n. November 2017, p. 172–182, 2018.

BRZOSTEK, Robson Cristiano. **Estudo da fratura em solda ponto por fricção em alumínio alclad 2024-t351 e alumínio 2024-t351: uma abordagem numérica e experimental**. 2012. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CAI, C. et al. Comparative study on laser welding characteristics of aluminium alloy under atmospheric and subatmospheric pressures. **Science and Technology of Welding and Joining**, [s. l.], v. 19, n. 7, p. 547–553, 2014.

CAIAZZO, Fabrizia et al. Butt autogenous laser welding of AA 2024 aluminium alloy thin sheets with a Yb:YAG disk laser. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 67, n. 9–12, p. 2157–2169, 2013.

CÂNDIDO, Geraldo Maurício et al. Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido à caracterização de tenacidade à fratura interlaminar em modo I TT - Fractography of aeronautical composite structures submitted to mode I interlaminar fracture toughness characterization. **Polímeros**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 41–53, 2012.

CAVALCANTE, Felipe Fernandes; DA SILVA, Wanderson Santana. Comportamento Mecânico da Liga de Alumínio 2024 Submetida a Diferentes Tempos de Envelhecimento. **Holos**, [s. l.], v. 8, p. 86, 2017.

CAVALIERE, P. et al. Mechanical and microstructural behaviour of 2024-7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s. l.], v. 46, n. 6, p. 588–594, 2006.

CHEN, Y. B. et al. Arc characteristics of laser-TIG double-side welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 438–444, 2008.

CHEN, Yajun et al. Effect of alternate corrosion factors on multiaxial low-cycle fatigue life of 2024-T4 aluminum alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 772, p. 1–14, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.282>>

CICAL, E. et al. Hot cracking in Al – Mg – Si alloy laser welding – operating parameters and their effects. [s. l.], v. 395, p. 1–9, 2005.

COELHO, Bruno Nazário. **Soldagem a laser dos aços inoxidáveis aisi 304 e aisi 316: análise microestrutural em função dos parâmetros operacionais**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais – Engenharia de Materiais). REDEMAT – Rede Temática em Engenharia de Materiais - Ouro Preto, 2012.

COELHO, Bruno Nazario; LIMA, Milton Sergio Fernandes; DA COSTA, Adilson Rodrigues. Soldagem do aço inoxidável AISI 316 com laser à fibra de alta potência: influência dos parâmetros operacionais na micro dureza e na susceptibilidade à corrosão eletrolítica dos cordões de solda Welding. **Revista Materia**, [s. l.], p. 1338–1349, 2013.

CUI, L. et al. Study on microtexture of laser welded 5A90 aluminium – lithium alloys using electron backscattered diffraction. [s. l.], v. 18, n. 3, p. 204–209, 2013.

DAI, Shao Cong; YE, Lin. Characteristics of CF/PEI tape winding process with on-line consolidation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 1227–1238, 2002.

DAVIS, G. D. et al. Application of surface behaviour diagrams to the study of hydration of phosphoric acid-anodized aluminium. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 1807–1818, 1982.

DAWKINS, B.; GRUENDER, F.; COPELAND, G. Polybenzimidazole (PBI) high temperature polymers and blends, High Temperature Polymer Blends, **Woodhead Publishing**, p. 174-212, 2014.

DE BAERE, I. et al. Study of the mode I and mode II interlaminar behaviour of a carbon fabric reinforced thermoplastic. **Polymer Testing**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 322–332, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.12.009>>.

DE OLIVEIRA, Paulo César A.; BERTAZZOLI, Rodnei. Determinação da densidade de corrente de corrosão em meios de baixa condutividade: Uso de microeletrodos para minimizar a queda ôhmica. **Química Nova**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 325–329, 2011.

DITTRICH, Dirk et al. Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design- First results. **Physics Procedia**, [s. l.], v. 12, n. PART 1, p. 113–122, 2011.

DOMINGUES, L.; FERNANDES, J. C. ..; FERREIRA, M. G. .. S. Anodização não poluente de ligas de alumínio. **Corrosão e protecção de materiais**, [s. l.], n. January 2003, 2003.

DUBÉ, Martine et al. Metal mesh heating element size effect in resistance welding of thermoplastic composites. **Journal of Composite Materials**, [s. l.], v. 46, n. 8, p. 911–919, 2012.

DUBEY, Avanish Kumar; YADAVA, Vinod. Laser beam machining — A review. [s. l.], v. 48, p. 609–628, 2008.

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>>.

ERDMANN, Marc; HOLZLEITNER, Jochen. An overview of the polymer-to-metal direct-adhesion hybrid technologies for load-bearing automotive components. [s. l.], v. 7, p. 363–373, 2007.

FARAHANI, Rouhollah Dermanaki; DUB, Martine. Novel Heating Elements for Induction Welding of Carbon Fiber / Polyphenylene Sulfide Thermoplastic Composites. [s. l.], v. 1700294, p. 1–10, 2017.

FARAHANI, Rouhollah Dermanaki; DUBÉ, Martine. Novel Heating Elements for Induction Welding of Carbon Fiber/Polyphenylene Sulfide Thermoplastic Composites. **Advanced Engineering Materials**, [s. l.], v. 19, n. 11, p. 1–10, 2017.

FARIA, Maria C. M. De; CIOFFI, Maria O. H.; BOTELHO, Edson C. Análise do efeito higrotérmico no comportamento em fadiga de compósitos de PPS/fibras de carbono. **Polímeros**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 7–12, 2012.

FERNANDEZ VILLEGAS, Irene; VIZCAINO RUBIO, Pablo. On avoiding thermal degradation during welding of high-performance thermoplastic composites to thermoset composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 77, p. 172–180, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.07.002>>.

FILHO, Sergio T. Rebitagem por fricção (“FricRiveting”). Desenvolvimento de uma nova técnica de união para juntas híbridas do tipo polímero-metal. Parte I: Processo e Microestrutura. **Soldagem e Inspeção**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 387–395, 2011.

GONÇALVES, J. et al. Friction spot welding of carbon fiber-reinforced polyamide 66 laminate. **Materials Letters**, [s. l.], v. 159, p. 506–509, 2015.

GOTO, Keita et al. Shear and tensile joint strengths of carbon fiber-reinforced thermoplastics using ultrasonic welding. **Composites Part A**, [s. l.], v. 116, n. October 2018, p. 126–137, 2019.

GALDÁMEZ, Edwin Vladimir Cardoza. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

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>>.

GRAHAM, D. P. et al. The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite-metal structures. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 64, p. 11–24, 2014.

GROUND, Aberdeen Proving. A Study on the Induction Heating of Conductive Fiber Reinforced Composites. [s. l.], v. 36, n. 04, p. 401–421, 2002.

GUO, Yanning; MA, Yue; WANG, Fei. Effect of Welding Parameter on Dynamic Fracture Properties of 2024-T3 Aluminum Friction Stir Welded Joints. **Procedia Structural Integrity**, [s. l.], v. 13, p. 806–812, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.155>>.

HABAZAKI, H. et al. Effects of alloying elements in anodizing of aluminium. **Transactions of the Institute of Metal Finishing**, [s. l.], v. 75, n. 1, p. 18–23, 1997.

HABOUDOU, A. et al. Reduction of porosity content generated during Nd : YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys. [s. l.], v. 363, p. 40–52, 2003.

HADDADI, Farid; ABU-FARHA, Fadi. Microstructural and mechanical performance of aluminium to steel high power ultrasonic spot welding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 225, p. 262–274, 2015.

HAQUE, Md Shaquibul; SIDDIQUI, Mohd. Anees. Plastic Welding: Important Facts and Developments. **American Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 15–19, 2016.

HEO, Jun Haeng et al. Regression equations of probability plot correlation coefficient test statistics from several probability distributions. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 355, n. 1–4, p. 1–15, 2008.

HOLMES, Mark. Aerospace looks to composites for solutions. **Reinforced Plastics**, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 237–241, 2017.

HUANG, Yongxian et al. Joining of aluminum alloy and polymer via friction stir lap welding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 257, n. February, p. 148–154, 2018. a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.02.043>>.

HUANG, Yongxian et al. Friction spot welding of carbon fiber-reinforced polyetherimide laminate. **Composite Structures**, [s. l.], v. 189, n. January, p. 627–634, 2018. b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.004>>.

HUANG, Zhequn; SUGIYAMA, Sumio; YANAGIMOTO, Jun. Hybrid joining process for carbon fiber reinforced thermosetting plastic and metallic thin sheets by chemical bonding and plastic deformation. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 213, n. 11, p. 1864–1874, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.015>>.

HUBER, S.; GLASSCHROEDER, J.; ZAEH, M. F. Analysis of the Metal Vapour during Laser Beam Welding. [s. l.], v. 12, p. 712–719, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.089>>.

ILMAN, M. N. Chromate inhibition of environmentally assisted fatigue crack propagation of aluminium alloy AA 2024-T3 in 3.5% NaCl solution. **International Journal of Fatigue**, [s. l.], v. 62, p. 228–235, 2014.

IZADI, Omid et al. An experimental study on mechanical properties of a novel hybrid metal–polymer joining technology based on a reaction between isocyanate and hydroxyl groups. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 30, p. 217–225, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.09.022>>.

JIANG, Zhenguo et al. Comparative study on fiber laser welding of GH3535 superalloy in continuous and pulsed waves. **Materials and Design**, [s. l.], v. 110, p. 728–739, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.055>>.

JIAO, Junke et al. Numerical and experimental investigation on joining CF RTP and stainless steel using fiber lasers. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 240, p. 362–369, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.013>>.

JUNIOR, Ricardo Tadeu Aureliano Junior. **Interferência do tratamento térmico t6 em juntas soldadas a laser de compósito de liga de alumínio aa356 reforçado com partículas de carvão de silício**. 2015. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Ciências) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2015.

KABCHE, Jean Paul et al. Experimental characterization of hybrid composite-to-metal bolted joints under flexural loading. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 66–78, 2007.

KAH, Paul et al. Techniques for joining dissimilar materials: Metals and polymers. **Reviews on Advanced Materials Science**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 152–164, 2014.

KAPPMAYER, Gregor et al. Modern machining of advanced aerospace alloys-Enabler for quality and performance. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 28–43, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.005>>.

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>>.

KARKHIN; PLOCHIKINE; BERGMANN. Solution of Inverse Heat Conduction Problem for Determining Heat Input, Weld Shape and Grain Structure During Laser Welding. **Science and Technology of Welding**, [s. l.], v. 7, No. 4, n. 4, p. 224–231, 2001.

KATAYAMA, Seiji; KAWAHITO, Yousuke; MIZUTANI, Masami. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects. **Physics Procedia**, [s. l.], v. 5, p. 9–17, 2010.

KATAYAMA, Seiji; KAWAHITO, Yousuke; MIZUTANI, Masami. Latest progress in performance and understanding of laser welding. [s. l.], v. 39, p. 8–16, 2013.

KESSLER, Berthold. Fiber Laser Welding in the Car Body Shop. [s. l.], v. 31, n. 4, p. 17–22, 2013.

KHALED, Yassin; MEHDI, Hojjati. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, [s. l.], 2017.

KHAN, Rafiullah. Fiber bridging in composite laminates: A literature review. **Composite Structures**, [s. l.], v. 229, n. July, 2019.

KLIAUGA, A. M.; VIEIRA, E. A.; FERRANTE, M. The influence of impurity level and tin addition on the ageing heat treatment of the 356 class alloy. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 480, n. 1–2, p. 5–16, 2008.

KLOCKE, Fritz et al. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 581–604, 2015.

KOZAK, Marcin. Analyzing one-way experiments: a piece of cake of a pain in the neck? **Scientia Agricola**, [s. l.], v. 66, n. 4, p. 556–562, 2009.

KUMAR, H. G. Prashanth.; XAVIOR, M. Anthony. Assessment of Mechanical and Tribological Properties of Al 2024- SiC - Graphene Hybrid Composites. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 174, p. 992–999, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.251>>.

KUMAR, Ranvijay et al. Weldability of thermoplastic materials for friction stir welding- A state of art review and future applications. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 137, n. November 2017, p. 1–15, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.039>>.

KUMAR, S. et al. Study on mechanical, morphological and electrical properties of carbon nanofiber/polyetherimide composites. **Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology**, [s. l.], v. 141, n. 1–2, p. 61–70, 2007.

LAMBIASE, F.; DURANTE, M.; DI ILIO, A. Fast joining of aluminum sheets with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) by mechanical clinching. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 236, p. 241–251, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.030>>.

LAMBIASE, F.; DURANTE, M.; ILIO, A. Di. Journal of Materials Processing Technology Fast joining of aluminum sheets with Glass Fiber Reinforced Polymer ( GFRP ) by mechanical clinching. **Journal of Materials Processing Tech.**, [s. l.], v. 236, p. 241–251, 2016.

LASTRES, Helena. **The Advanced Materials Revolution and the Japanese System of Innovation**. United Kingdom: Palgrave Macmillan UK. 1994. 246 p.

LI, Ying; MURR, L. E.; MCCLURE, J. C. Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 271, n. 1–2, p. 213–223, 1999.

LIN, Y. C. et al. Precipitation in Al-Cu-Mg alloy during creep exposure. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 556, p. 796–800, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.07.069>>.

LIN, Y. C. et al. Precipitation hardening of 2024-T3 aluminum alloy during creep aging. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 565, p. 420–429, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.058>>.

LIONETTO, Francesca et al. Finite element modeling of continuous induction welding of thermoplastic matrix composites. **Materials and Design**, [s. l.], v. 120, p. 212–221, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.024>>.

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. January, p. 134–142, 2018. a.

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. b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.021>>.

LIONETTO, Francesca; BALLE, Frank; MAFFEZZOLI, Alfonso. Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 247, n. March, p. 289–295, 2017.

LIONETTO, Francesca; MOSCATELLO, Anna; MAFFEZZOLI, Alfonso. Effect of binder powders added to carbon fiber reinforcements on the chemoreology of an epoxy resin for composites. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 112, p. 243–250, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.031>>.

LIU, F. C.; LIAO, J.; NAKATA, K. Joining of metal to plastic using friction lap welding. **Materials and Design**, [s. l.], v. 54, p. 236–244, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.056>>.

LIU, Yuanyuan et al. Structure and corrosion behavior of sputter deposited cerium oxide based coatings with various thickness on Al 2024-T3 alloy substrates. **Applied Surface Science**, [s. l.], v. 355, p. 805–813, 2015.

LOPEZ-GARRITY, O.; FRANKEL, G. S. Corrosion Inhibition of Aluminum Alloy 2024-T3 by Sodium Molybdate. **Journal of The Electrochemical Society**, [s. l.], v. 161, n. 3, p. C95–C106, 2013.

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>>.

MAHMOOD; KHAN, M. I. STATE-OF-THE-ART IN RIGID P.V.C. PLASTIC WELDING BY HOT AIR TECHNIQUE. **International Journal of Technical Research and Applications**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 20–23, 2013.

MARCZIS, B.; CZIGÁNY, T. Interrelationships Between Welding Parameters of Hot-Gas Welded Polypropylene. **POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE**, [s. l.], p. 1173–1181, 2006.

MARIAM, M. et al. Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy/glass fibre reinforced composites fabricated with different joining methods. **Composite Structures**, [s. l.], v. 200, n. April, p. 647–658, 2018.

MASOUMI KHALILABAD, Mahdi et al. Effect of tool geometry and welding speed on mechanical properties of dissimilar AA2198–AA2024 FSWed joint. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 34, n. May, p. 86–95, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.030>>.

MCKEEN, Laurence W. Polyimides. **Permeability Properties Of Plastics And Elastomers**, [s.l.], p.115-127, 2017. Elsevier.

MITSCHANG, Peter; VELTHUIS, Rudi; DIDI, Mirja. Induction spot welding of metal/CFRPC hybrid joints. **Advanced Engineering Materials**, [s. l.], v. 15, n. 9, p. 804–813, 2013.

MIZUKAMI, Koichi et al. Detection of delamination in thermoplastic CFRP welded zones using induction heating assisted eddy current testing. **Ndt & e International**, [s.l.], v. 74, p.106-111, 2015.

MOLDAVSKI, Naomi; COHEN, Smadar. Determinants of liposome partitioning in aqueous two-phase systems: Evaluation by means of a factorial design. **Biotechnology and Bioengineering**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 529–537, 1996.

MÖLLER, F.; THOMY, C. Interaction effects between laser beam and plasma arc in hybrid welding of aluminum. **Physics Procedia**, [s. l.], v. 41, p. 81–89, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.054>>.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MONTORO, Sergio Roberto et al. Influence of voids on the flexural resistance of the NCF/RTM6 composites. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 10, p.3220-3225, 2011.

MOURA, M. F. S. F.; MORAIS, A. B.; MAGALHÃES, A. G. **Materiais compósitos – materiais, fabrico e comportamento mecânico**. Porto: Pubblindústria, 369 p., 2005.

MOY, Charles K. S. et al. Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminium alloy. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 552, p. 48–60, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.113>>.

MUKHOPADHYAY, Nitish; DE SILVA, Basil M. Theory and applications of a new methodology for the random sequential probability ratio test. **Statistical Methodology**, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 424–453, 2008.

NAGATSUKA, Kimiaki et al. Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 73, p. 82–88, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.029>>.

NETO, B.; B. SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. Campinas: UNICAMP, 2003. 403 p.

NIE, Baohua et al. Effect of anodizing treatment on the very high cycle fatigue behavior of 2A12-T4 aluminum alloy. **Materials and Design**, [s. l.], v. 50, p. 1005–1010, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.083>>.

O. BALKAN; H. DEMIRER; H.YILDIRIM. Morphological and mechanical properties of hot gas welded PE, PP and PVC sheets. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 60–70, 2008.

OKADA, Toshiya; UCHIDA, Shouhei; NAKATA, Kazuhiro. Effect of anodizing on direct joining properties of aluminium alloy and plastic sheets by friction lap joining. **Welding International**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 85–94, 2018.

OLADIMEJI, Ojo Olatunji; TABAN, Emel. Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys. **Welding in the World**, [s. l.], v. 60, n. 3, p. 415–457, 2016.

OLIVEIRA, Gustavo H.; GUIMARÃES, Valdir a.; BOTELHO, Edson C. Influência da temperatura no desempenho mecânico de compósitos PEI/fibras de vidro. **Polímeros**, [s. l.], v. 19, p. 305–312, 2009.

OSTACHOWICZ, Wiesław M. et al. Damage Identification and Assessment in Composite Structures. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 188, p. 241–247, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.480>>.

PACIORNIK, S.; ALMEIDA, J. Digital microscopy and image analysis applied to composite materials characterization. [s. l.], n. Dm, p. 172–181, 2010.

PALIBRODA, E. et al. Aluminium porous oxide growth. On the electric conductivity of the barrier layer. **Thin Solid Films**, [s. l.], v. 256, n. 1–2, p. 101–105, 1995.

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>>.

PANTELAKIS, Sp G.; CHAMOS, A. N.; KERMANIDIS, Al Th. A critical consideration for the use of Al-cladding for protecting aircraft aluminum alloy 2024 against corrosion. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 36–42, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2011.12.006>>.

PAPPADÀ, Silvio et al. Fabrication of a thermoplastic matrix composite stiffened panel by induction welding. **Aerospace Science and Technology**, [s. l.], v. 43, p. 314–320, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2015.03.013>>.

PARKES, P. N. et al. Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement. **Composite Structures**, [s. l.], v. 118, n. 1, p. 250–256, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.07.019>>.

PETROYIANNIS, P. V. et al. Corrosion-induced hydrogen embrittlement of 2024 and 6013 aluminum alloys. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, [s. l.], v. 41, n. 1–3, p. 173–183, 2004.

PRAMANIK, A. et al. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 101, p. 1–29, 2017.

PRUDHOMME, M. et al. Effect of actual and accelerated ageing on microstructure evolution and mechanical properties of a 2024-T351 aluminium alloy. **International Journal of Fatigue**, [s. l.], v. 107, n. September 2017, p. 60–71, 2018.

RAMBABU, P; et al. Aerospace Materials and Material Technologies. In: PRASAD, N. E;; WANHILL, R. J. H. (Eds.). **Aerospace Materials and Material Technologies**. 1. ed. Singapura: Springer, 2017. p. 23.

RANA, Soheli; FANGUEIRO, Raul. **Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering**: Processing, Properties and Applications. United States: Woodhead Publishing, 2016. 496 p.

RASCH, Michael et al. Shaped laser beam profiles for heat conduction welding of aluminium-copper alloys. **Optics and Lasers in Engineering**, [s. l.], v. 115, n. July 2018, p. 179–189, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.11.025>>.

RED, Chris. **Composites in commercial aircraft engines, 2014-2023**. 2015. Disponível em: <<https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-commercial-aircraft-engines-2014-2023>><https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-commercial-aircraft-engines-2014-2023>>. Acesso em: 1 fev. 2019.

REIS, Jonas Frank et al. Assessment of the interlaminar strength of resistance-welded PEI/carbon fibre composite. **Welding International**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 149–160, 2018. Disponível em: <<http://doi.org/10.1080/09507116.2017.1347329>>.

REZENDE, Mirabel C. Fractografia de Compósitos Estruturais. **Polímeros**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. E4–E11, 2007.

RODRIGUES, M.I; IEMMA A.F. **Planejamento de experimentos e Otimização de processos uma estratégia sequencial de planejamentos**. Editora Casa do Pão , Campinas 2005.

RODRÍGUEZ-VIDAL, E. et al. Experimental investigation into metal micro-patterning by laser on polymer-metal hybrid joining. **Optics and Laser Technology**, [s. l.], v. 104, p. 73–82, 2018.

ROJAS, Yuly Andrea Herrera. **Estudo eletroquímico e caracterização das camadas de produtos de corrosão por co2 em aços api5l x80 e api 5ct p110**. 2015. 167 f. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Puc -Rio, Rio de Janeiro, 2015.

SÁNCHEZ-AMAYA, J. M. et al. Weldability of Aluminum Alloys with High-Power Diode Laser. **Welding Journal**, [s. l.], n. May, p. 155–161, 2012. Disponível em: <[http://files.aws.org/wj/supplement/WJ\\_2012\\_05\\_s155.pdf](http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_2012_05_s155.pdf)>.

SÁNCHEZ-AMAYA, Jose et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti5553 Butt Welds Performed by LBW under Conduction Regime. **Metals**, [s. l.], v. 7, n. 7, p. 269, 2017.

SANTOS, Alberto Lima. **Influência do tratamento eletroquímico do alumínio 2024 t3 para aplicação em compósitos fc/epoxi/alumínio**. 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

SAYAMA, R. **Efeitos da soldagem por laser de fibra de Yb na microestrutura do compósito a356/sicp**. 2016. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Ciências) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2016.

SCHMUTZ, P.; FRANKEL, G. S. Characterization of AA2024-T3 by Scanning Kelvin Probe Force Microscopy. **Journal of The Electrochemical Society**, [s. l.], v. 145, n. 7, p. 2285–2295, 1998.

SCHWEIER, M. et al. Spatter formation in laser welding with beam oscillation. **Physics Procedia**, [s. l.], v. 41, p. 20–30, 2013.

SEYYED MONFARED ZANJANI, Jamal; AL-NADHARI, Abdulrahman Saeed; YILDIZ, Mehmet. Manufacturing of electroactive morphing carbon fiber/glass fiber/epoxy composite: Process and structural monitoring by FBG sensors. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], v. 130, n. May, p. 458–466, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.05.015>>.

SHEIKH-AHMAD, J. Y. et al. Friction stir welding of high density polyethylene—Carbon black composite. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 264, n. September 2018, p. 402–413, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.09.033>>.

SHEIKHI, M. et al. Characterisation of solidification cracking in pulsed Nd : YAG laser welding of 2024 aluminium alloy. [s. l.], v. 14, n. 2, p. 161–165, 2009.

SHI, H.; VILLEGAS, I. Fernandez; BERSEE, H. E. N. Strength and failure modes in resistance welded thermoplastic composite joints: Effect of fibre-matrix adhesion and fibre orientation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 55, p. 1–10, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.08.008>>.

SHI, Hongwei et al. Protection of 2024-T3 aluminium alloy by corrosion resistant phytic acid conversion coating. **Applied Surface Science**, [s. l.], v. 280, p. 325–331, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.04.156>>.

SHI, Huajie et al. Continuous resistance welding of thermoplastic composites: Modelling of heat generation and heat transfer. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 70, p. 16–26, 2015.

SHI, Huajie; VILLEGAS, Irene Fernandez; BERSEE, Harald E. N. a Study of Process Induced Voids in Resistance Welding of Thermoplastic Composites. [s. l.], n. July, p. 19–24, 2015.

SHOKRIEH, M. M.; SALAMAT-TALAB, M.; HEIDARI-RARANI, M. Effect of initial crack length on the measured bridging law of unidirectional E-glass/epoxy double cantilever beam specimens. **Materials and Design**, [s. l.], v. 55, p. 605–611, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.064>>.

SOKOLOV, Mikhail; SALMINEN, Antti. Methods for improving laser beam welding efficiency. **Physics Procedia**, [s. l.], v. 56, n. C, p. 450–457, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.148>>.

STOKES, Vijay K. A phenomenological study of the hot-tool welding of thermoplastics. Part 1: Polycarbonate. **Polymer**, [s. l.], v. 40, n. 23, p. 6235–6263, 1999.

TALREJA, Ramesh. Damage and fatigue in composites - A personal account. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 68, n. 13, p. 2585–2591, 2008.

TAN, Xianghu et al. Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining of CFRP and steel. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 70, p. 35–43, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.023>>.

TAWFIQ, Thaier A. et al. Spot Welding of Dissimilar Metals Using an Automated Nd : YAG Laser System. [s. l.], v. 11, p. 1–5, 2012.

THOMPSON, G. E. et al. Anodizing of aluminium alloys. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, [s. l.], v. 71, n. 3, p. 228–238, 1999.

TROUGHTON, M. (Ed). **Handbook of plastics joining**: A practical guide. 2 ed. Cambridge: William Andrew Inc. 2008. 590 p.

TSANGARAKI-KAPLANOGLU, I. et al. Effect of alloy types on the anodizing process of aluminum. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], v. 200, n. 8, p. 2634–2641, 2006.

TSUKAMOTO, S. High speed imaging technique Part 2 - High speed imaging of power beam welding phenomena. **Science and Technology of Welding and Joining**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 44–55, 2011.

TU, Jay F.; PALEOCRASSAS, Alexander G. x Low speed laser welding of aluminium alloys using single-mode fiber lasers. [s. l.], 2002.

TURNER, Paul. Response surfaces for an F-test for cointegration. **Applied Economics Letters**, [s. l.], v. 13, n. 8, p. 479–482, 2006.

UCSNIK, S. et al. Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. 369–374, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.11.003>>.

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://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.041>>.

VILLARROEL, J. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 123, p. 37, 2012.

WANG, Hongyang; YANG, Kai; LIU, Liming. The analysis of welding and riveting hybrid bonding joint of aluminum alloy and polyether-ether-ketone composites. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 36, n. May, p. 301–308, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.10.031>>.

WANG, Q. G. Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, [s. l.], v. 34, n. 12, p. 2887–2899, 2003.

WANG, Wen Xue et al. Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 40, n. 9, p. 1447–1455, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.029>>.

WANG, Yu et al. Investigation of wing structure layout of aerospace plane based on the finite element method. **Advances in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 1–9, 2017.

WANG, Zeyu et al. Microstructure and properties of friction stir welded 2219 aluminum alloy under heat treatment and electromagnetic forming process. **Metals**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 1–12, 2018.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: Edusp, 2003.

WU, S. C. et al. On the fatigue performance of laser hybrid welded high Zn 7000 alloys for next generation railway components. **International Journal of Fatigue**, [s. l.], v. 91, p. 1–10, 2016.

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, Bing et al. Preparation and characterization of carbon and carbon/zeolite membranes from ODPA-ODA type polyetherimide. **Journal of Membrane Science**, [s. l.], v. 474, p. 114–121, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2014.09.054>>.

ZHANG, C. Q.; ROBSON, J. D.; PRANGNELL, P. B. Dissimilar ultrasonic spot welding of aerospace aluminum alloy AA2139 to titanium alloy TiAl6V4. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 231, p. 382–388, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.008>>.

ZHANG, Sheng et al. Effect of coastal atmospheric corrosion on fatigue properties of 2024-T4 aluminum alloy structures. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 802, p. 511–521, 2019.

ZHANG, Weilong; FRANKEL, G. S. Transitions between pitting and intergranular corrosion in AA2024. **Electrochimica Acta**, [s. l.], v. 48, n. 9 SPEC., p. 1193–1210, 2003.

ZHANG, Xuesong; CHEN, Yongjun; HU, Junling. Recent advances in the development of aerospace materials. **Progress in Aerospace Sciences**, [s. l.], v. 97, n. January, p. 22–34, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001>>.

ZHAO, H.; WHITE, D. R.; DEBROY, T. Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys. [s. l.], v. 44, n. 6, p. 238–266, 1999.

ZHAO, Tian et al. Mechanical behaviour of thermoplastic composites spot-welded and mechanically fastened joints: A preliminary comparison. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 112, p. 224–234, 2017.

## APÊNDICES

APÊNDICE A - Resultados provenientes da dureza Vickers para a liga como recebida e após a soldagem por OFW.

| Condição                              | HV    | Média | Desvio Padrão |
|---------------------------------------|-------|-------|---------------|
| Liga AA2024-T3 como recebida          | 139.5 | 140.0 | 1.2           |
|                                       | 140.8 |       |               |
|                                       | 137.7 |       |               |
|                                       | 141.5 |       |               |
|                                       | 138.9 |       |               |
| Liga AA2024-T3 após a soldagem<br>OFW | 107.4 | 107.0 | 0.99          |
|                                       | 105.8 |       |               |
|                                       | 107.3 |       |               |
|                                       | 107   |       |               |
|                                       | 105.2 |       |               |

APÊNDICE B - Resultados provenientes da dureza Vickers para a soldagem a laser Yb: fibra.

| Condição                                  | HV  | Média | Desvio Padrão |
|-------------------------------------------|-----|-------|---------------|
| Liga AA2024-T3 após a soldagem<br>a laser | 119 | 113.7 | 2.86          |
|                                           | 113 |       |               |
|                                           | 113 |       |               |
|                                           | 109 |       |               |
|                                           | 113 |       |               |
|                                           | 115 |       |               |
|                                           | 114 |       |               |

APÊNDICE C - Valores de rugosidade, Ra e Rz, com suas respectivas médias e desvio padrão.

| Condições AA2024-T3 |         |               |         |
|---------------------|---------|---------------|---------|
| Como recebido       |         | Anodizado     |         |
| Ra (µm)             | Rz (µm) | Ra (µm)       | Rz (µm) |
| 2.12                | 30.62   | 2.76          | 47.60   |
| 2.09                | 39.05   | 3.12          | 46.12   |
| 2.18                | 33.74   | 3.05          | 49.67   |
| 2.17                | 28.50   | 3.03          | 54.00   |
| 2.05                | 30.05   | 2.72          | 45.40   |
| Ra                  |         | Ra            |         |
| Média               | 2.12    | Média         | 2.94    |
| Desvio Padrão       | 0.05    | Desvio Padrão | 0.18    |
| Rz                  |         | Rz            |         |
| Média               | 32.39   | Média         | 48.55   |
| Desvio Padrão       | 4.18    | Desvio Padrão | 3.45    |

APÊNDICE D – Resultado da análise de variância ANOVA obtido a partir do software *Design Expert 6.0* para a soldagem OFW.

ANOVA for Response Surface Quadratic Model

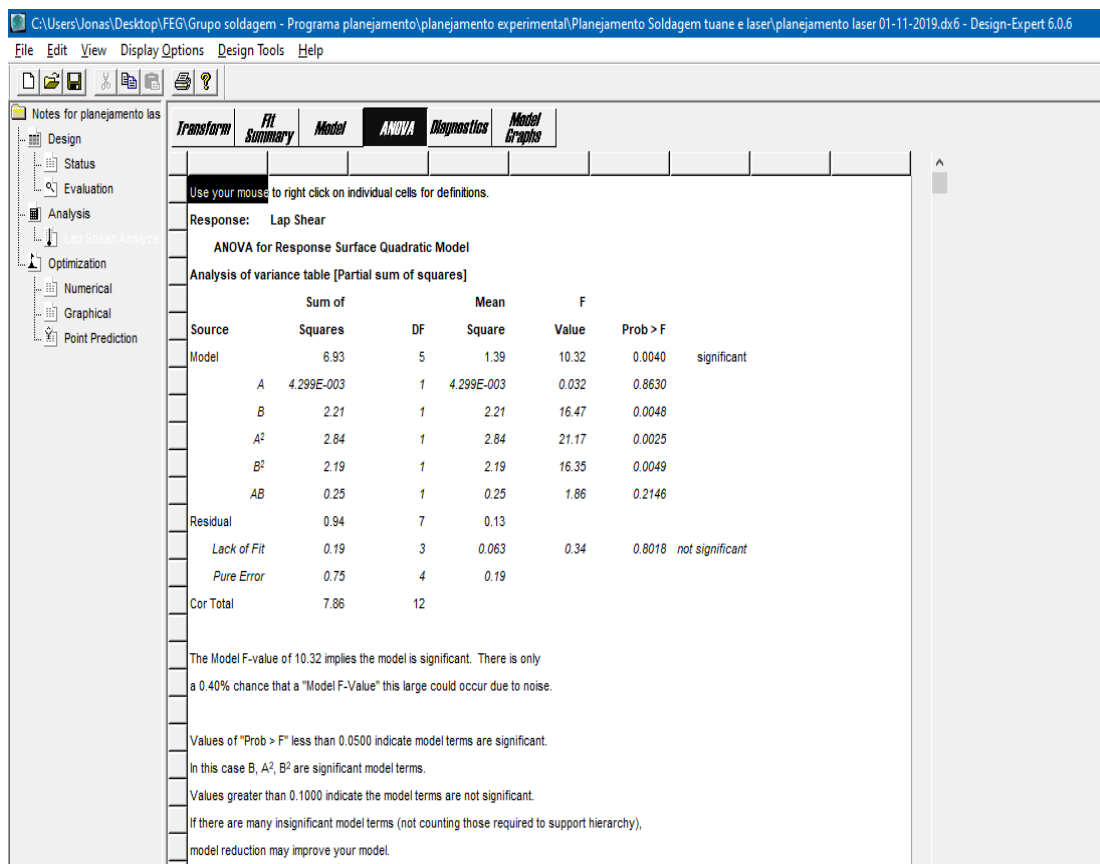
Analysis of variance table [Partial sum of squares]

| Source         | Sum of Squares | DF | Mean Square | F Value | Prob > F |                 |
|----------------|----------------|----|-------------|---------|----------|-----------------|
| Model          | 41.36          | 5  | 8.27        | 6.01    | 0.0179   | significant     |
| A              | 9.68           | 1  | 9.68        | 7.03    | 0.0328   |                 |
| B              | 8.26           | 1  | 8.26        | 6.00    | 0.0441   |                 |
| A <sup>2</sup> | 15.27          | 1  | 15.27       | 11.10   | 0.0126   |                 |
| B <sup>2</sup> | 0.23           | 1  | 0.23        | 0.17    | 0.6951   |                 |
| AB             | 8.15           | 1  | 8.15        | 5.93    | 0.0451   |                 |
| Residual       | 9.63           | 7  | 1.38        |         |          |                 |
| Lack of Fit    | 5.00           | 3  | 1.67        | 1.44    | 0.3559   | not significant |
| Pure Error     | 4.63           | 4  | 1.16        |         |          |                 |
| Cor Total      | 50.98          | 12 |             |         |          |                 |

The Model F-value of 6.01 implies the model is significant. There is only a 1.79% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case A, B, A<sup>2</sup>, AB are significant model terms. Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

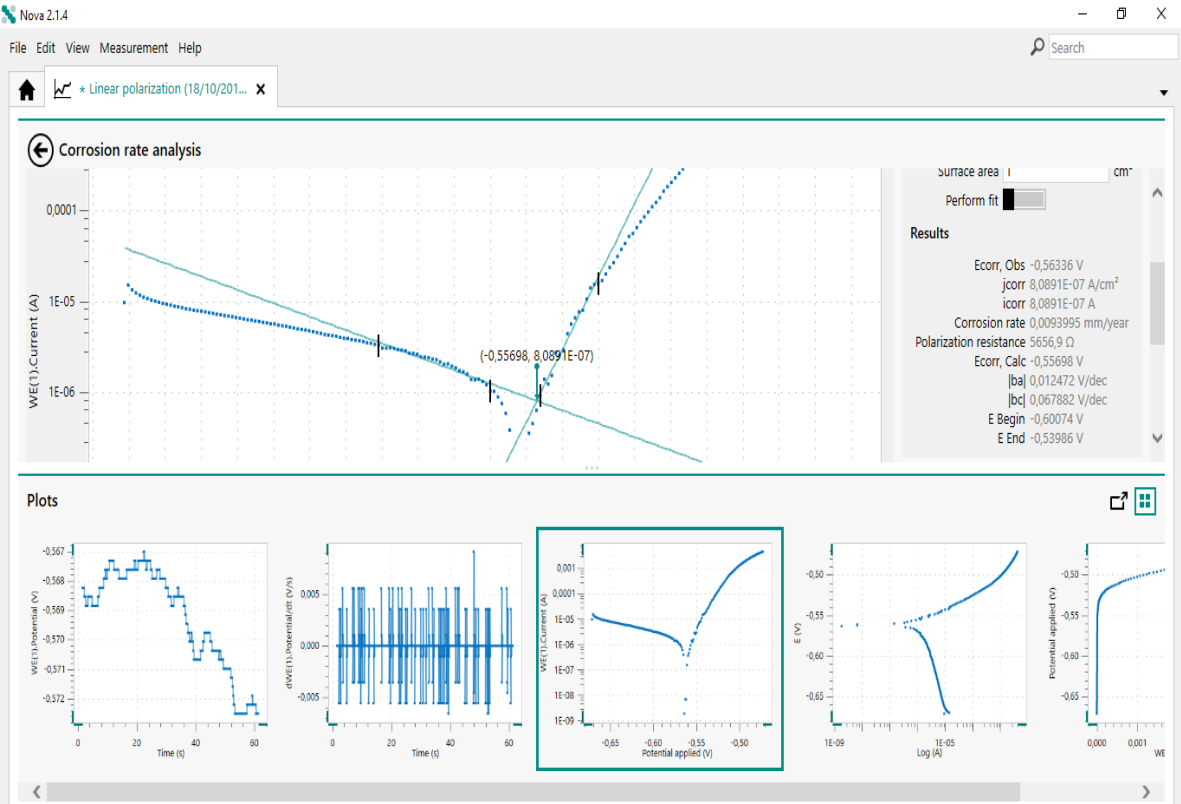
APÊNDICE E – Resultado da análise de variância ANOVA obtido a partir do software *Design Expert 6.0* para a soldagem a laser Yb: fibra.



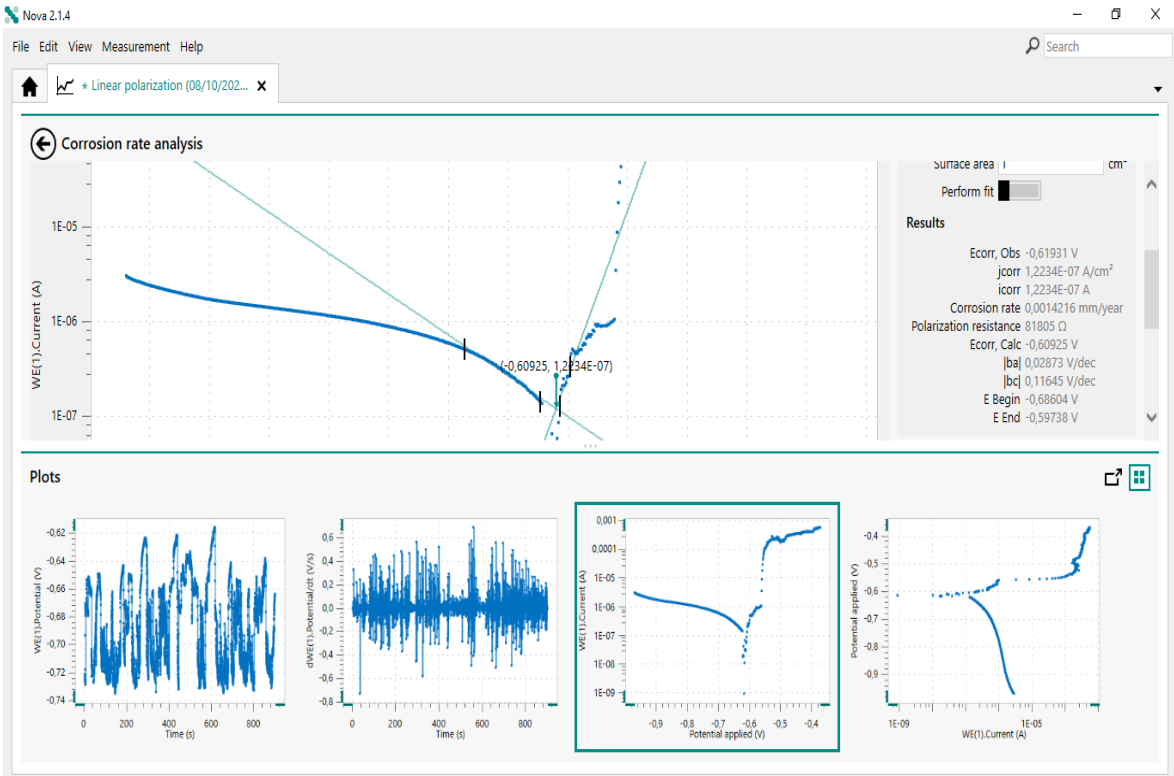
APÊNDICE F – Dados de ILSS da soldagem OFW o laminado e a liga.

| Palavra-chave                                             |               |                   | Nome do produto    |             |                  |
|-----------------------------------------------------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------|------------------|
| Nome do arquivo do ILSS-PEI - OFW do arquivo do milis-pes |               |                   | FV_AI-5Kn.mak      |             |                  |
| Data do relatório                                         | 2018/07/16    |                   | Data do ensaio     | 2018/07/16  |                  |
| Modo de ensaio                                            | Simplex       |                   | Tipo de ensaio     | Dobr.3ptos  |                  |
| Velocidade                                                | 0,5mm/min     |                   | Placa              | Placa       |                  |
| Batch No:                                                 | 1             |                   | Sub-batch No:      | 5           |                  |
| ILSS 1                                                    | Ruptura_Força | Máx_Força         | EASL1_Deslocam     | LASE1_Força |                  |
|                                                           | Parâmetros    | Sensibilidade: 10 | Cálculo de áreas c | Força 1 N   | Deslocamento 1 m |
|                                                           | Unidade       | N                 | N                  | mm          | N                |
|                                                           | 1             | --                | 1126,74            | 0,11390     | 551,002          |
|                                                           | Média         | --                | 1126,74            | 0,11390     | 551,002          |
|                                                           | DesvioPadrão  | --                | --                 | --          | --               |
| ILSS-2                                                    | Ruptura_Força | Máx_Força         | EASL1_Deslocam     | LASE1_Força |                  |
|                                                           | Parâmetros    | Sensibilidade: 10 | Cálculo de áreas c | Força 1 N   | Deslocamento 1 m |
|                                                           | Unidade       | N                 | N                  | mm          | N                |
|                                                           | 1             | 670,921           | 1331,69            | 0,08560     | 1062,44          |
|                                                           | Média         | 670,921           | 1331,69            | 0,08560     | 1062,44          |
|                                                           | DesvioPadrão  | --                | --                 | --          | --               |
| ILSS-3                                                    | Ruptura_Força | Máx_Força         | EASL1_Deslocam     | LASE1_Força |                  |
|                                                           | Parâmetros    | Sensibilidade: 10 | Cálculo de áreas c | Força 1 N   | Deslocamento 1 m |
|                                                           | Unidade       | N                 | N                  | mm          | N                |
|                                                           | 1             | --                | 1175,53            | 0,15823     | 1029,78          |
|                                                           | Média         | --                | 1175,53            | 0,15823     | 1029,78          |
|                                                           | DesvioPadrão  | --                | --                 | --          | --               |
| ILSS-4                                                    | Ruptura_Força | Máx_Força         | EASL1_Deslocam     | LASE1_Força |                  |
|                                                           | Parâmetros    | Sensibilidade: 10 | Cálculo de áreas c | Força 1 N   | Deslocamento 1 m |
|                                                           | Unidade       | N                 | N                  | mm          | N                |
|                                                           | 1             | 929,941           | 1574,06            | 0,18045     | 1287,48          |
|                                                           | Média         | 929,941           | 1574,06            | 0,18045     | 1287,48          |
|                                                           | DesvioPadrão  | --                | --                 | --          | --               |
| ILSS-5                                                    | Ruptura_Força | Máx_Força         | EASL1_Deslocam     | LASE1_Força |                  |
|                                                           | Parâmetros    | Sensibilidade: 10 | Cálculo de áreas c | Força 1 N   | Deslocamento 1 m |
|                                                           | Unidade       | N                 | N                  | mm          | N                |
|                                                           | 1             | 987,612           | 1209,11            | 0,01131     | 1047,59          |
|                                                           | Média         | 987,612           | 1209,11            | 0,01131     | 1047,59          |
|                                                           | DesvioPadrão  | --                | --                 | --          | --               |

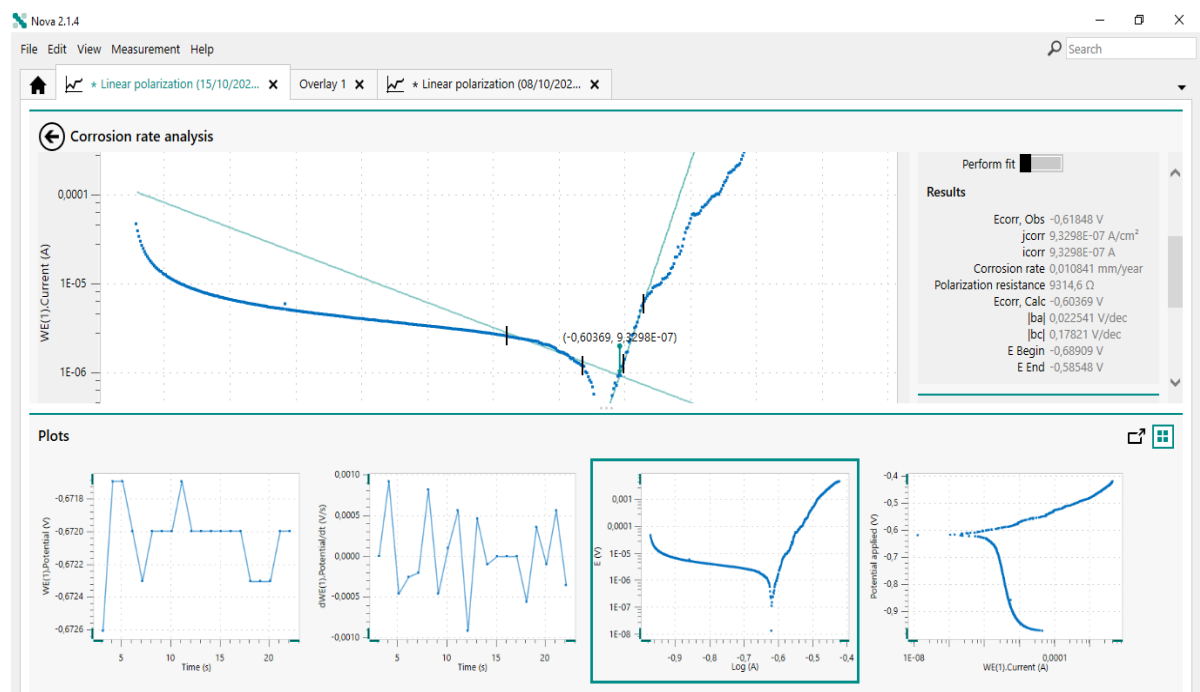
APÊNDICE G – Curvas de Tafel da liga AA2024-T3 como recebida.



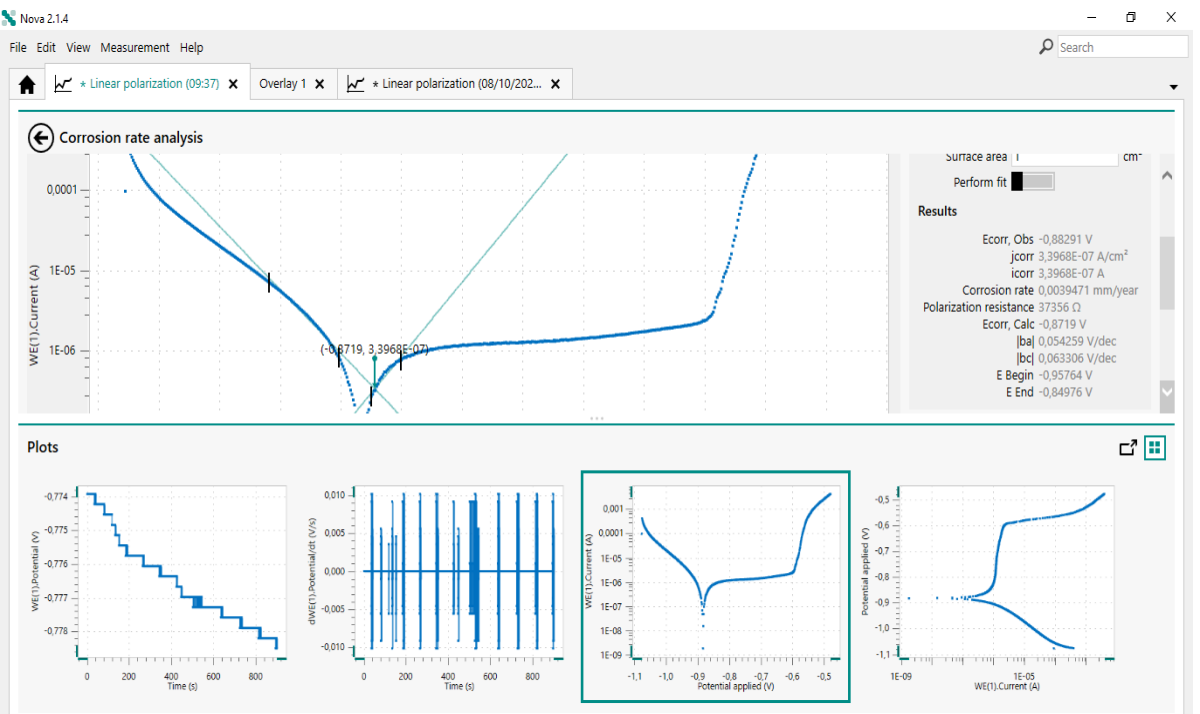
APÊNDICE H – Curvas de Tafel da liga AA2024-T3 anodizada.



APÊNDICE I – Curvas de Tafel da liga AA2024-T3 soldada por OFW.



APÊNDICE J – Curvas de Tafel da liga AA2024-T3 soldada a laser.



## ANEXOS

ANEXO A - Fichas referentes ao laminado PEI fornecidas pelo fabricante *Toray Advanced Composites*.



### PRODUCT DATA SHEET

#### PHYSICAL PROPERTIES

| Property                                                                               | 8 Harness Satin<br>(EC9 Glass<br>Woven Prepreg)    | 5 Harness Satin<br>(FT300B Carbon<br>Woven Prepreg) | Plain Weave<br>(FT300B Carbon<br>Woven Prepreg)    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Fiber areal weight (FAW)                                                               | 300 g/m <sup>2</sup> (8.85 oz/yd <sup>2</sup> )    | 280 g/m <sup>2</sup> (8.26 oz/yd <sup>2</sup> )     | 200 g/m <sup>2</sup> (5.90 oz/yd <sup>2</sup> )    |
| Weight per ply (PAW)                                                                   | 450 g/m <sup>2</sup> (13.27 oz/yd <sup>2</sup> )   | 484 g/m <sup>2</sup> (14.27 oz/yd <sup>2</sup> )    | 346 g/m <sup>2</sup> (10.20 oz/yd <sup>2</sup> )   |
| Resin content by weight (RC)                                                           | 33%                                                | 42%                                                 | 42%                                                |
| Consolidated ply thickness (CPT)                                                       | 0.24 mm (0.0094")                                  | 0.32 mm (0.0127")                                   | 0.23 mm (0.0091")                                  |
| Density                                                                                | 1.91 g/cm <sup>3</sup> (118.9 lb/ft <sup>3</sup> ) | 1.51 g/cm <sup>3</sup> (93.95 lb/ft <sup>3</sup> )  | 1.51 g/cm <sup>3</sup> (93.95 lb/ft <sup>3</sup> ) |
| For the availability of other reinforcements, please contact Toray Advanced Composites |                                                    |                                                     |                                                    |

#### MECHANICAL PROPERTIES

| EC9 Glass 300gsm FAW BHS Woven Fabric Reinforced Laminate 33% RC |           |             |          |         |
|------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|----------|---------|
| Property                                                         | Condition | Test Method | Result   |         |
| Tensile Strength 0°                                              | RTD       | EN2747-3    | 518 MPa  | 75 ksi  |
| Tensile Modulus 0°                                               | RTD       | EN2747-3    | 25.0 GPa | 3.6 Msi |
| Tensile Strength 90°                                             | RTD       | EN2747-3    | 442 MPa  | 64 ksi  |
| Tensile Modulus 90°                                              | RTD       | EN2747-3    | 24.2 GPa | 3.5 Msi |
| Compression Strength 0°                                          | RTD       | ASTM D 6841 | 613 MPa  | 89 ksi  |
| Compression Modulus 0°                                           | RTD       | ASTM D 6841 | 29.2 GPa | 4.2 Msi |
| Compression Strength 90°                                         | RTD       | ASTM D 6841 | 490 MPa  | 71 ksi  |
| Compression Modulus 90°                                          | RTD       | ASTM D 6841 | 27.6 GPa | 4.0 Msi |
| Flexural Strength 0°                                             | RTD       | ISO 178     | 781 MPa  | 113 ksi |
| Flexural Modulus 0°                                              | RTD       | ISO 178     | 24.5 GPa | 3.6 Msi |
| Flexural Strength 90°                                            | RTD       | ISO 178     | 617 MPa  | 89 ksi  |
| Flexural Modulus 90°                                             | RTD       | ISO 178     | 22.2 GPa | 3.2 Msi |

#### MECHANICAL PROPERTIES

| Standard Modulus FT300B 3K Carbon 280gsm FAW 5HS Woven Fabric Reinforced Laminate 42% RC                       |           |             |          |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|----------|---------|
| Property                                                                                                       | Condition | Test Method | Result   |         |
| Flexural Strength 0°                                                                                           | RTD       | ISO 178     | 880 MPa  | 128 ksi |
| Flexural Modulus 0°                                                                                            | RTD       | ISO 178     | 49.7 GPa | 7.2 Msi |
| Flexural Strength 90°                                                                                          | RTD       | ISO 178     | 873 MPa  | 127 ksi |
| Flexural Modulus 90°                                                                                           | RTD       | ISO 178     | 49.5 GPa | 7.2 Msi |
| Data generated from a limited dataset<br>50% fiber by volume (Vf)<br>Room Temperature Dry (RTD) at 23°C (72°F) |           |             |          |         |

#### FLAMMABILITY PROPERTIES

| Test           | Specification                             | Criteria                                        | 1 Ply of 7581<br>PEI Resin | 2 Plies of 7581<br>PEI Resin | 5 Plies of 7581<br>PEI Resin |
|----------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Flammability   | 60-second vertical burn<br>FAR 25.853 (a) | 152 mm                                          | PASS                       | PASS                         | PASS                         |
| Smoke Emission | ABD0031 (F)                               | 150/200                                         | PASS                       | PASS                         | PASS                         |
| Toxicity       | ABD0031 (F)                               | DS Max 4 min<br>(Flaming/Non-Flaming) = 150     | PASS                       | PASS                         | PASS                         |
| Heat Release   | FAR 25.853 (d)                            | 2-min Total HR<br>(kW min/m <sup>2</sup> ) = 65 | 5.6                        | 2.7                          | 4                            |
|                |                                           | Peak HR (kW/m <sup>2</sup> ) = 65               | 13.6                       | 12.3                         | 20                           |

#### HANDLING SAFETY

Health and safety information on handling and processing Toray composite materials is described in the Safety Data Sheet available from Toray Advanced Composites. To obtain this or any other information about Toray Cetex® PEI thermoplastic composite materials, contact Toray Advanced Composites.

ANEXO B – Composição da liga AA2024-T3 fornecida pela empresa FIBRAER - Aeroservice Comércio Peças/Manut. Aeron. LTDA.

| Atributo do Certificado de Qualidade | Valor de Atributo |
|--------------------------------------|-------------------|
| Norma                                | GOST 21631-76     |
| Alongamento max (%)                  | 20                |
| Zn (%)                               | 0,14              |
| Ti (%)                               | 0,06              |
| Al (%)                               | bal               |
| Alongamento min (%)                  | 19,4              |
| Mn (%)                               | 0,46              |
| Fe (%)                               | 0,34              |
| Mg (%)                               | 1,52              |
| Estado de Fornecimento               | T351              |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| Cr (%)                         | 0,01   |
| Cu (%)                         | 4,7    |
| Outros Elementos: Total        | 0,02   |
| Outros Elementos: Cada         | <0,05  |
| Resistência à Tração min (MPa) | 439,3  |
| Número de Testes               | -      |
| Resistência à Tração max (MPa) | 458,95 |
| Zr (%)                         | 0,01   |
| Tensão de Escoamento min (MPa) | 320,7  |
| Si (%)                         | 0,29   |

| Linha 2xxx                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----------|
| Composição Química                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | 2024      |
| Al                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | balanço   |
| Zn                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | <0,25     |
| Cu                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | 3,8-4,9   |
| Mg                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | 1,2-1,8   |
| Si                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | <0,5      |
| Cr                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | <0,10     |
| Fe                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | <0,5      |
| Mn                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | 0,3-0,90  |
| Propriedades Mecânicas                                                                                                                                                                                                                                                                        |     | 2024 T351 |
| Limite de Resistência                                                                                                                                                                                                                                                                         | Mpa | 460       |
| Limite de Escoamento                                                                                                                                                                                                                                                                          | Mpa | 324       |
| Elasticidade                                                                                                                                                                                                                                                                                  | %   | 18        |
| Dureza                                                                                                                                                                                                                                                                                        | HB  | 120       |
| Outras Informações                                                                                                                                                                                                                                                                            |     | 2024 T351 |
| Usinabilidade                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     | Ótima     |
| Soldabilidade                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     | -         |
| <i>Ligas de alumínio de uso aeroespacial.</i><br><i>Principais vantagens: alta resistência mecânica, fácil e rápida usinagem, excelente acabamento. Pode ser anodizado. Solda apenas por resistência. "electron beam welding" e "friction stir welding".</i><br><i>Espessuras: 1 a 4.5 mm</i> |     |           |