

MARCOS PAULO SOUZA RIBEIRO

Avaliação do efeito da anodização em juntas soldadas de PEI/fibra de vidro e AA 2024-T3 pelo método oxi-combustível

Marcos Paulo Souza Ribeiro

Avaliação do efeito da anodização em juntas soldadas de PEI/fibra de vidro e AA 2024-T3 pelo método oxi-combustível

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zenhei Nakazato
Coorientadores: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho e Prof^a. Dr^a. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão

Guaratinguetá/SP
2022

R484a	Ribeiro, Marcos Paulo Souza Avaliação do efeito da anodização em juntas soldadas de PEI / Fibra de vidro e AA 2024-T3 pelo método Oxi-Combustível / Marcos Paulo Souza Ribeiro – Guaratinguetá, 2022. 117 f : il. Bibliografia: f. 101-110 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Roberto Zenhei Nakazato Coorientadores: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho Profª Drª Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão 1. Soldagem. 2. Compósitos poliméricos. 3. Ligas de alumínio. 4. Corrosão. I. Título.
-------	---

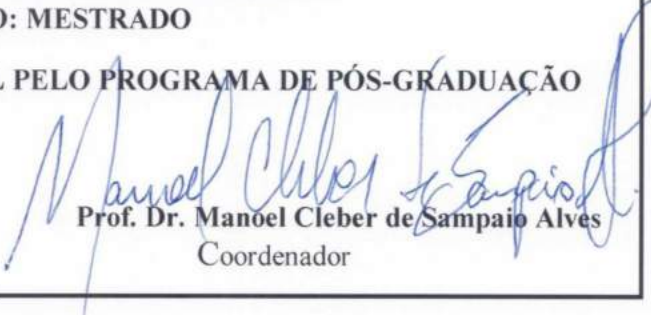
CDU 621.791(043)

MARCOS PAULO SOUZA RIBEIRO

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ROBERTO ZENHEI NAKAZATO

Orientador - UNESP

participou por videoconferência


Prof.ª. Dr.ª. RITA DE CASSIA MENDONÇA SALES CONTINI

FATEC São José dos Campos

participou por videoconferência


Prof. Dr. ROGERIO PINTO MOTA

UNESP

participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

MARCOS PAULO SOUZA RIBEIRO

NASCIMENTO 15/10/1992 – Pindamonhangaba, SP

FILIAÇÃO Ana Pereira de Souza Ribeiro
Jose Carlos Ribeiro

2011/2016 Curso de Graduação (Tecnologia em Manutenção Industrial).
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba.

2016/2019 Curso de Graduação (Tecnologia em Processos Metalúrgicos).
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba.

2019/2022 Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (Mestrado Acadêmico)
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” –
(FEG/UNESP)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida e saúde, pois nesses tempos difíceis ele tem sido o pilar de tudo para poder chegar até aqui.

Agradeço a minha família por todo o apoio necessário para me tornar o que sou hoje incentivando os meus estudos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Roberto Zenhei Nakazato pelo apoio, compreensão e paciência, pela amizade, por acreditar em mim e me dar a oportunidade de atuar em um campo de pesquisa com relevância, e um potencial enorme para pesquisa a ser explorado.

Aos meus coorientadores Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho e Prof.^a Dr^a. Ana Beatriz Ramos Abrahão pela ajuda necessária em todos os sentidos seja fornecendo os materiais necessários e ajudando na elaboração e continuidade desse projeto.

Aos amigos e companheiros que me ajudaram na execução desse projeto em especial: Isabela Cintra, Rafael Resende e Luís Felipe Marques.

Aos amigos, funcionários e professores da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá e da FATEC de Pindamonhangaba pela estrutura cedida para a realização deste trabalho.

À Professora Dr^a. Rita de Cássia Mendonça Sales Contini, disponibilizando seu tempo para realizar as caracterizações de microscopia eletrônica da varredura.

À Prof.^a Dr^a. Heloisa Andrea Acciari e ao Prof. Dr. Ronaldo Spezia Nunes pela ajuda no decorrer do projeto, ajudando na parte de corrosão e eletroquímica.

Ao Prof. Dr. Rogério Pinto Mota, pela disponibilidade e auxílio nas análises, e pelo total acesso aos laboratórios do Departamento de Física, FEG.

Ao Departamento de Materiais e Processos da Divisão de Engenharia Mecânica do Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA, São José do Campos, pela colaboração nas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura.

À CAPES pelo apoio financeiro durante a realização deste trabalho, pois tal apoio foi fundamental para dar continuidade ao Projeto de pesquisa.

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

“Enquanto você sonha, você está fazendo
o rascunho do seu futuro “
Charlin Chaplin

RESUMO

Compósitos poliméricos podem ser definidos como a combinação de dois ou mais materiais que sejam elementos de reforços unidos por uma matriz polimérica. Esta junção deve exibir uma proporção significativa das propriedades dos materiais. A liga de alumínio AA 2024-T3 é utilizada em vários segmentos estruturais das aeronaves. Esses componentes atuam expostos a condições ambientais bastante agressivas sofrendo processo de degradação e corrosão afetando diretamente seu desempenho, muitas vezes sendo necessária a realização de tratamentos superficiais para aumentar a sua resistência. Um dos interesses de estudos e de indústrias do setor aeronáutico é a possibilidade de união destes, para fins de reparo e formação de novas estruturas, neste sentido vem-se estudando diversos processos de união de materiais compósitos com destaque para a soldagem. Este trabalho tem como objetivo a execução de diferentes condições do processo de anodização, variando-se os parâmetros de potencial e tempo para a obtenção junta híbridas de liga AA 2024 com compósito PEI/fibra de vidro pelo método OFW (oxi-combustível), e a influência do processo de anodização nas suas propriedades, sendo caracterizadas por técnicas eletroquímicas, rugosidade, molhabilidade e medição da espessura de sua camada. Após o processo de soldagem as juntas foram submetidas a ensaio de *Lap Shear* para a verificação da sua resistência mecânica (MPa). Com os resultados do ensaio e por meio de planejamento (fatorial) 2^2 foi possível encontrar a melhor condição de anodização, sendo de 10V/20min, resultando numa resistência de 14 MPa. Posteriormente as amostras na melhor condição foram submetidas ao teste de condicionamento ambiental higrotérmica, em água do mar sintética, em diferentes temperaturas (30°C e 60°C), depois de imersas foram realizados ensaios de *Lap Shear* e ILSS para verificação de sua resistência ao processo de degradação/corrosão. As amostras na melhor condição apresentaram melhor resistência à corrosão e maior resistência mecânica, sendo esse aspecto comprovado por meio de microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Quando imersas em solução salina foi verificado que as amostras imersas em maior temperatura tiveram uma diminuição em sua resistência em comparação com as amostras não imersas.

PALAVRAS-CHAVE; Processo de soldagem. oxi-combustível. Alumínio AA 2024.compósito PEI/Fibra de vidro. Corrosão. Degradação.

ABSTRACT

Polymeric composites can be defined as the combination of two or more materials that are reinforcing elements joined by a polymeric matrix. This junction must exhibit a significant proportion of the material properties. The AA 2024-T3 aluminum alloy is used in several structural segments of aircraft. These components act exposed to very aggressive environmental conditions, suffering degradation and corrosion processes directly affecting their performance, often requiring treatments surface to increase your resistance. One of the interests of studies and industries in the aeronautical sector is the possibility of joining these, for the purpose of repair and formation of new structures. This work aims to perform different conditions of the anodization process, varying the parameters of potential and time for obtaining hybrid AA 2024 alloy with PEI/fiberglass composite by the OFW method (oxy fuel), and the influence of the anodization process on its properties, being characterized by electrochemical techniques, roughness, wettability and measurement of the thickness of its layer. After the welding process, the joints were subjected to the Lap Shear test to verify their mechanical strength (MPa), with the results of the test and through planning (factorial) 2^2 it was possible to find the best anodizing condition, being 10V/20min, resulting in a resistance of 14 MPa. Subsequently, the samples in the best condition were subjected to a hygrothermal environmental conditioning test, being immersed in synthetic seawater at different temperatures (30°C and 60°C), after being immersed, Lap Shear and ILSS tests were performed to verify their resistance to the degradation/corrosion process. The samples in the best condition showed better corrosion resistance and greater mechanical resistance, and this aspect was proven by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). When immersed in saline solution it was found that samples immersed at higher temperature had a decrease in their strength compared to non-immersed samples.

KEYWORDS: Welding process. Oxy-fuel. AA 2024 Aluminum. PEI/Fiberglass. Composite. Corrosion. Degradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Tipos de tratamento para as ligas de alumínio	23
Figura 2 - Locais onde são utilizados o AA2024 T3 em uma aeronave.....	25
Figura 3 - Exemplificação da percentagem dos materiais utilizados na fabricação da aeronave 787.....	27
Figura 4 – Curvas tensão – deformação dos principais reforços utilizados	28
Figura 5 - Representação química das cadeias do PEI	31
Figura 6 – Tipos de uniões para compósitos.	32
Figura 7 – Ilustração do processo de soldagem de polímeros termoplásticos.....	33
Figura 8 - Exemplo do processo de difusão durante a soldagem.	34
Figura 9 – Esquematização do processo de soldagem por gás quente.	34
Figura 10 - Representação do sistema de vazão e controle dos gases e produção da chama.....	37
Figura 11 - Dispositivo desenvolvido para soldagem	38
Figura 12 - Equipamento de soldagem (gás GLP) utilizado para a junção metal-compósito.	39
Figura 13 - Processo de soldagem por oxi-combustível.....	39
Figura 14 – Ilustração do processo de anodização	40
Figura 15 - (a) Estrutura das camadas barreira e porosa; (b) Ilustração do transporte de íons.	41
Figura 16 - Ilustração da anodização por ácido fosfórico.	42
Figura 17: Fluxograma das etapas a realizadas no desenvolvimento do trabalho.....	46
Figura 18 — Amostas de PEI/fibra de vidro utilizados na soldagem.	48
Figura 19 – Amostas da liga AA 2024 utilizados na soldagem.....	48
Figura 20 – a) Cuba eletrolítica com os componentes, b) Fonte de alimentação (CC) utilizada na anodização.....	49
Figura 21 - Dispositivo de soldagem para a união metal-compósito.	52
Figura 22 - Processo de soldagem por oxi-combustível.....	53
Figura 23 - Pirômetro utilizado para a medição da temperatura.	53
Figura 24 - Dispositivo utilizado para fixação da liga AA 2024 e PEI/Fibra de vidro durante a soldagem.	54

Figura 25 – Postenciostato/galvanostato EG&G utilizados nos ensaios eletroquímicos.	55
Figura 26 - Célula eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos.	55
Figura 27 - Amostras soldadas de AA 2024 e PEI/fibra de vidro antes da imersão: a) amostras de LSS; b) amostras de ILSS.....	56
Figura 28 - a) aquário para o banho a 30°C; b) banho termostatizado para o banho a 60°C	57
Figura 29 – a) Amostra soldada da liga AA2024 com PEI/fibra de vidro, fixada na célula de carga; b) Equipamento utilizado para o ensaio de Lap Shear.	58
Figura 30 - Ferramenta utilizada para o ensaio de ILSS.	59
Figura 31 - Estereoscópio utilizado para análise.	60
Figura 32 – Microscópio óptico utilizado para análise.	60
Figura 33 - Microscopia Eletrônica de Varredura – (MEV) utilizado.	56
Figura 34 - Goniômetro utilizado para análise.	56
Figura 35 - Rugosímetro utilizado para medição da rugosidade.	57
Figura 36 – Curvas de densidade de corrente-tempo para as diferentes condições de anodização.	59
Figura 37 – a) Vista de topo da amostra PEI/fibra de vidro e AA 2024 soldada. b) vista lateral da junta soldada.	60
Figura 38 a) Curvas de nível na soldagem entre a liga AA2024 e o compósito PEI/Fibra de vidro; b) Superfície de resposta do processo de anodização.	65
Figura 39 – Curvas de potencial de circuito aberto para a liga AA2024 sem tratamento e nas diferentes condições de anodização, em solução de NaCl 3,5% (m/m).....	67
Figura 40 - Curvas de polarização da liga AA2024 não-anodizada e nas diferentes condições de anodização, obtidas após 24 h de imersão, em solução de NaCl 3,5% (m/m).	69
Figura 41 - Espessura média da camada de óxido formada nas diferentes condições de anodização.	71
Figura 42 – Imagens MO das camadas de óxido para cada condição de anodização; aproximação de 200x.....	72
Figura 43- Valores médios de ângulo de contato da liga AA 2024 nas diferentes condições de anodização.	74
Figura 44 - Imagens da gota de água na superfície da liga AA 2024 nas diferentes condições de anodização.	74

Figura 45 - Valores de rugosidade (Ra) da liga AA 2024 nas diferentes condições de anodização.	76
Figura 46 - Amostra de PEI fibra de Vidro e da liga AA 2024 rompida.....	77
Figura 47 - Região rompida da amostra da liga AA 2024 anodizada em 10V/5 min: a) aproximação de 6,5x ; b) aproximação de 10x.....	78
Figura 48 - Região rompida da amostra da liga AA 2024 anodizada em 15V/12,5 min:a) aproximação de 6,5x ; b) aproximação de 10x.....	79
Figura 49 – Região rompida das amostras da liga AA 2024 anodizadas em 20V/25 min e	80
Figura 50 - Região rompida da amostra da liga AA 2024 anodizada em 10V/20 min:a) aproximação de 6,5x ; b) aproximação de 10x.....	81
Figura 51 – Imagens MEV da superfície da liga AA 2024 anodizada nas diferentes condições de potencial e tempo. Aproximação de 1000x.	82
Figura 52 – Ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo.	84
Figura 53 - Avaliação de difusividade do ganho de massa nas diferentes temperaturas	85
Figura 54 – Valores médios de resistência à tração (LSS) das juntas soldadas antes e após imersão em água do mar sintética em 30 ° e 60 °C.	88
Figura 55 – Valores médios de tensão de cisalhamento (ILSS) das juntas soldadas antes e após imersão em água do mar sintética em 30 ° e 60 °C.	90
Figura 56 - Amostras após imersão: a) 30 °C; b)60 °C.....	91
Figura 57 - Região rompida da liga AA 2024 após imersão em água do mar sintética, a 30 °C. Aproximação de 6,5 x.....	92
Figura 58 - Região rompida da liga AA 2024 após imersão em água do mar sintética, a 60 °C. Aproximação de 6,5 x.....	93
Figura 59 - Imagens do produto de corrosão das amostras imersas: a) 30°C b) 60°C; aproximação de 1000x.....	94
Figura 60 – Espectro de EDS do produto de corrosão formado sobre a liga AA 2024, após o ensaios de imersão.....	94
Figura 61 – Imagem de ILSS da junta soldada sem imersão: a) aproximação de 6,8x; b) aproximação de 40x.....	95
Figura 62 - Imagem de ILSS da junta soldada após imersão em 30 °C: a) aproximação de 6,8x; b) aproximação de 40x.....	95
Figura 63 - Imagem de ILSS da junta soldada após imersão em 60 °C: a) aproximação de 6,8x; b) aproximação de 40x.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Vantagens e desvantagens da utilização do alumínio.....	21
Tabela 2 - Divisão das ligas de alumínio.....	22
Tabela 3- Tratamento das ligas de alumínio.....	24
Tabela 4 - Elementos de liga presente no AA 2024-T3	24
Tabela 5 - Vantagens da utilização de materiais compósitos.	26
Tabela 6 - Propriedades da fibra de vidro-S.	29
Tabela 7 - Propriedades do Poli (éter-imida) - PEI	30
Tabela 8– Potenciais de eletrodo padrão em condição ambiente, a 25 °C.	43
Tabela 9 - Distribuição das partículas na liga AA2024 T3.	44
Tabela 10– Condições mínimas e máximas para o processo de anodização.....	51
Tabela 11 - Parâmetros do processo de soldagem por oxi-combustível.....	52
Tabela 12 - Parâmetros iniciais de potencial e tempo para o processo de anodização... 58	
Tabela 13 – Condições de anodização, temperatura de soldagem e valores de Lap Shear das amostras soldadas.....	61
Tabela 14 - Matriz experimental e resultados de Lap Shear.	62
Tabela 15 - Análise de variância (ANOVA) para do processo de anodização da liga AA2024.	63
Tabela 16 – Potenciais em circuito aberto para a liga AA2024 sem tratamento (padrão) e nas diferentes condições de anodização, em solução de NaCl 3,5% (m/m).....	67
Tabela 17 - Potencial de corrosão (E_{corr}) e densidade de corrente de corrosão (j_{corr}) obtidos das curvas de polarização das amostras após imersão por 24 horas (Fig. 40). ...	69
Tabela 18 - Valores de espessura da camada formada nas amostras de AA2024, nas diferentes condições de anodização.....	70
Tabela 19 - Valores de ângulo de contato nas diferentes condições de anodização.	73
Tabela 20 - Valores da rugosidade aritmética nas diferentes condições de anodização.75	
Tabela 21 – Ganho de massa para a junta AA 2024 e compósito PEI/fibra de vidro. ..	84
Tabela 22 - Valores de coeficiente angular (n) e coeficiente de difusão (D).	87
Tabela 23 - Valores do ensaio de Lap Shear das amostras soldadas, antes e após os ensaios de imersão em água do mar sintética.	88
Tabela 24 - Valores de tensão de cisalhamento (ILSS) das juntas soldadas antes e após imersão em água do mar sintética em 30 ° e 60 °C.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS

AA2024-T3: *Aluminum Alloy 2024-T3*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

BSAA: Anodização sulfúrico-bórico

CAA: anodização crômica

FML: laminados fibra – metal

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CCD: *Central Composite Design*

EPH: Eletrodo padrão de hidrogênio

GLP: Gás Liquefeito de Petróleo

ILSS: Resistencia ao Cisalhamento Interlaminar

LSS: *Lap Shear Strength*

MPa: *Mega Pascal*

NCA: anodização sem cromato

OFW: *Oxi Fuel Welding*

PAA: anodização fosfórica

PEI: Poli (éter-imida)

PSA: Anodização fosfórico- sulfúrico

SAA: Anodização sulfúrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA.....	21
2.1.1 Tratamento das ligas de alumínio	23
2.1.2 Liga de alumínio AA 2024–T3.....	24
2.2 COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA.....	26
2.2.1 Fibra de vidro	28
2.2.2 Poli (éter-imida)	29
2.3 SOLDAGENS DE MATERIAIS COMPÓSITOS	31
2.3.1 Junções de estruturas híbrida metal–polímero	35
2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM POR OXI-COMBUSTÍVEL.....	37
2.5 ANODIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA2024.....	40
2.6 CORROSÃO DA LIGA AA2024 T3	43
2.7 CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 MATERIAIS.....	47
3.1.1 Compósito.....	47
3.1.2 Liga de alumínio AA2024-T3.....	48
3.2 MÉTODOS	49
3.2.1 Tratamento de anodização da liga AA 2024.....	49
3.2.2 Planejamento Experimental	50
3.2.3 Processo de soldagem por oxi-combustível (OFW)	51

3.2.4 Ensaios eletroquímicos	54
3.2.5 Ensaio higrotérmico (imersão em água do mar sintética)	56
3.2.6 Teste <i>Lap Shear</i> (LSS)	57
3.2.7 Ensaio de ILSS (interlaminar shear strength)	58
3.2.8 Microscopia óptica.....	60
3.2.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	60
3.2.10 Análise de molhabilidade	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1 ANODIZAÇÃO DA LIGA AA2024-T3.....	58
4.2 PROCESSO DE SOLDAGEM OFW	60
4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	61
4.4 POTENCIAL EM CIRCUITO ABERTO (E_{CA})	66
4.5 CURVA DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA	67
4.6 ESPESSURA DA CAMADA FORMADA NA ANODIZAÇÃO	70
4.7 ENSAIO DE MOLHABILIDADE.....	72
4.8 ENSAIO DE RUGOSIDADE	75
4.9 MICROSCOPIAS ÓPTICAS DAS AMOSTRAS ROMPIDAS APÓS O ENSAIO DE LSS	77
4.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	81
4.11 ABSORÇÃO DE UMIDADE DAS AMOSTRAS IMERSAS	83
4.12 ENSAIOS <i>LAP SHEAR</i> (LSS) DAS AMOSTRAS IMERSAS	87
4.13 ILSS DAS AMOSTRAS IMERSAS.....	89
4.14 MICROSCOPIA ÓPTICA DAS AMOSTRAS IMERSAS (LSS).....	91
4.15 MICROSCOPIA DA JUNTA SOLDADA (ILSS)	94
5 CONCLUSÃO	98
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
5.2 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS GERADAS	100

REFERÊNCIAS	101
APÊNDICE A – Valores do ângulo de contato das amostras anodizadas ..	111
APÊNDICE B – Valores do ensaio de “ILSS” (Newton) das amostras anodizadas na melhor condição e que foram imersas em água do mar sintética nas diferentes temperaturas.	112
APÊNDICE C – Valores obtidos dos ensaios de “<i>Lap Shear</i>” das amostras soldadas por OFW (GLP). Soldagem probatória para a melhor condição de potencial e tempo de anodização da liga AA 2024.....	113
APÊNDICE D- Valores de rugosidade das amostras da liga AA 2024 anodizadas.	114
ANEXO A - Informações sobre o AA 2024-T3 da fornecedora VBT- Viner Brasil Tecnologia	115
ANEXO B – Informações do laminado PEI/Fibra de Vidro da empresa Toray Advanced Composites.....	116

1 INTRODUÇÃO

No setor aeroespacial o crescente uso de compósitos vem surgindo como uma alternativa às estruturas metálicas convencionais. Esses materiais proporcionam menor peso quando comparado aos metais, equivalente resistência mecânica e maior resistência à corrosão. Atualmente, as resinas termoplásticas se destacam em suas propriedades quando comparadas com as resinas termorrígidas, por apresentarem vantagens como baixa absorção de umidade, fácil reparação e o fato de não permanecerem enrijecidas, fazendo com que possam ser reaquecidas e moldadas. Por este motivo, essas resinas apresentam um crescimento de suas aplicações na fabricação de compósitos até mesmo estruturais, destacando-se entre elas as resinas PEI (poli(éter-imida)) e PPS (poli(sulfeto de fenileno)) (BATISTA; BOTELHO, 2009; MARQUES et al., 2010).

O polímero poli(éter-imida), PEI, é um termoplástico de estrutura amorfa, transparente e de coloração amarelada. As poliimidas apresentam boa resistência mecânica, que lhe permitem serem usadas em temperaturas de até 260°C. Sua estrutura química consiste em repetidas imidas aromáticas e unidade de éter, apresentando elevada temperatura de transição vítrea (220°C). Sua estrutura não é afetada pelos ciclos térmicos na etapa de processamento e sua molécula proporciona uma boa fusão durante sua fabricação e uma boa resistência dos produtos (OLIVEIRA; BOTELHO, 2007; ABRAHÃO, 2015).

Na fabricação de compósitos poliméricos, as fibras são comumente usadas como fase de reforço e, quanto a fibra contínua apresenta comprimento igual à maior dimensão da peça, ocorre a máxima transferência das propriedades mecânicas desta para o compósito. As principais fibras utilizadas como material de reforço são a fibra de vidro, aramida e carbono (MAZUR, 2010). O reforço pode atuar como elevadores de dureza e força, entretanto, dependendo da fibra pode haver diminuição de outras propriedades como resistência à corrosão e a sua condutividade elétrica (VENTURA, 2009).

As fibras de vidros são os tipos de reforços mais utilizados para os compósitos termorrígidos e termoplásticos, constituindo boa parte dos reforços utilizados no mercado. Uma das principais vantagens desta fibra é sua resistência à tração e seu baixo custo em comparação a outras usadas. Esses tipos de reforços apresentam baixa resistência a abrasão, módulo de elasticidade mais baixo em comparação a outras fibras e baixa adesão à alguns tipos de matrizes poliméricas (FELTRAN, 2008; DA SILVA, 2005).

As ligas de alumínio AA2024-T3 são muito utilizadas no setor aeronáutico devido sua alta resistência mecânica resultante da adição de cobre (Cu), devido à formação de pequenos precipitados finamente dispersos por processo de envelhecimento controlado. Essas ligas apresentam maior dureza e resistência à tração que as ligas de alumínio comercialmente puro, mas apresenta menor resistência à corrosão localizada, devido à presença de diferentes fases Al-Cu, que têm comportamento anódico em relação a sua matriz (PEREIRA et al., 2000; QUEIROZ, 2008)

Atualmente, para uma maior gama de aplicação de materiais compósitos e para a manutenção de equipamentos muitas técnicas de união estão sendo desenvolvidas. Estas técnicas são classificadas basicamente como: fixação mecânica, união adesiva e união por fusão (soldagem). Dentre os métodos utilizados, a soldagem vem se destacando, pois possibilita a eliminação de tensões residuais resultantes de técnicas de uniões mecânicas e maior rapidez em relação às técnicas por uniões adesivas (SOUZA, 2013; ABRAHÃO, 2015).

O processo de soldagem por chama oxi-combustível (OFW) vem sendo adaptado para a soldagem destes materiais, pois possui vantagens na utilização como versatilidade, baixo custo e controle do calor e da temperatura ao qual o material será submetido. Este processo consiste na utilização de uma chama produzida pela combustão de um gás (por exemplo propano), onde é aplicada diretamente sobre liga de alumínio (por esta possuir excelente condutividade térmica) em contato direto com a amostra do laminado a ser soldada. Atualmente, já existem estudos como o de Reis et al. (2018) que utilizam esta técnica para união de compósitos poliméricos com liga de alumínio AA2024. Este tipo de união abre a possibilidade para aquisição e reparo de produtos para aplicação, principalmente, no setor aeronáutico. Por outro lado, estes estudos também abrem a questão de que quando submetidos a condições de serviço, principalmente em relação ao material metálico, terão a mesma vida útil de como se fossem utilizados separadamente.

Materiais compósitos apresentam baixa degradação, entretanto, podem apresentar falhas como delaminação, porosidade, ou descontinuidade das fibras. Já, as ligas de alumínio podem sofrer corrosão localizada comprometendo assim a vida útil da estrutura (LEITE, 2014; QUEIROZ, 2008; SOUZA, 2013).

Com a junção desses materiais dissimilares, uma boa adesão entre a liga de alumínio e o compósito é fundamental para o desempenho das juntas soldadas. Para que ocorra uma boa adesão, uma das alternativas encontradas é o desengorduramento do metal em soluções

alcalinas ou solventes orgânicos, seguida da anodização em soluções de ácido sulfúrico, crômico ou fosfórico. Este processo produz uma camada fina de óxido, com alta rugosidade e resistente à umidade, e consiste no tratamento mais usado em componentes aeronáuticos (SANTOS et al., 2020).

Dentre os vários fatores que podem afetar as propriedades dos materiais, o tratamento da superfície do alumínio vem se mostrando cada vez mais efetivo, pois pode melhorar o desempenho da união da liga com a resina epóxi, fazendo com que haja melhor desempenho mecânico na junção (WANG et al., 2014). Verificou-se que pode se obter uma melhor adesão fazendo o desengorduramento da superfície do alumínio em solução alcalina e subsequentemente fazendo a sua neutralização em solução ácida, porém em certas áreas que não ocorria à junção, tinha-se início o processo de corrosão. Foi examinado que a suscetibilidade à corrosão na superfície do material é reduzida se o alumínio logo depois de neutralizado for realizado o processo de anodização (YIWEI et al, 2014).

A anodização das ligas de alumínio pode depender de vários parâmetros dentre eles potencial, corrente, tempo de duração e composição das ligas tratadas. Este processo nas ligas de alumínio promove a formação do crescimento de dois tipos de camadas, a camada barreira e a camada porosa. A camada barreira forma-se logo acima do substrato, logo após esse processo se inicia o crescimento da camada porosa (MENEGHESSO, 2007; REGONE, 2004).

Estudos realizados por Botelho et al. (2004) e Yiwei et al. (2016) mostram que pode se obter uma boa aderência entre os materiais pelo tratamento superficial de anodização, pois este método apresenta baixo custo de execução e boa estabilidade. Neste processo é criada uma camada de óxido na superfície do alumínio, gerando maior rugosidade e uma maior adesão mecânica na junção (WANG et al, 2014).

Portanto, este trabalho propôs o estudo e caracterização de juntas soldadas de PEI/fibra de vidro com a liga de alumínio AA2024 tratada em diferentes condições de anodização, a fim de verificar a influência do tratamento de superfície no ancoramento entre os materiais, o desempenho das juntas soldadas e proteção contra a corrosão na liga de alumínio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a influência dos parâmetros de anodização e seu papel na resistência mecânica e de degradação/corrosão da liga de alumínio AA2024-T3 em juntas soldadas de compósito PEI-fibra de vidro.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Preparar amostras de liga de alumínio 2024 em diferentes condições de potencial e tempo de anodização, em solução de ácido fosfórico, H_3PO_4 10 % (em massa);
- Preparar as juntas compósito/liga AA2024, nas diferentes condições de anodização, por soldagem pelo método oxi-combustível ; realizar caracterização da junta soldada por meio do ensaio de LSS.
- Verificar a melhor condição de anodização para a soldagem por meio de planejamento experimental.
- Submeter as amostras soldadas na melhor condição a condicionamento higrotérmico em água do mar sintética.
- Caracterizar as amostras anodizadas por técnicas eletroquímicas como potencial em circuito aberto e curva de polarização potenciodinâmica, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, ângulo de contato etc;
- Caracterizar as juntas soldadas quanto à morfologia, propriedades mecânicas por meio de LSS e ILSS, condicionamento ambiental e resistência à corrosão em ambiente salino.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

A escolha do tipo da liga a ser utilizada leva em conta às condições em que o material será submetido, sendo essa escolha influenciada pelas propriedades da liga tais como força, ductilidade, resistência à propagação de trinca, resistência à fadiga e à corrosão, pois esses dois últimos fatores são questões importantes na avaliação da vida útil das estruturas das aeronaves, tendo uma relativa importância econômica (LEITE, 2014). A Tabela 1 apresenta as vantagens e desvantagens na utilização do alumínio na construção de aeronaves.

Tabela 1– Vantagens e desvantagens da utilização do alumínio.

Vantagens	Desvantagens
Alta resistência e rigidez específica	Relativamente baixo limite de escoamento
Limite de resistência e módulo de elasticidade aceitáveis	Relativamente baixa dureza e resistência ao desgaste
Tratáveis termomecanicamente (trabalháveis-envelhecíveis)	Baixa temperatura de fusão
Ampla gama de variedade de propriedades mecânicas	Baixa temperatura de uso (superenvelhecimento)
Custo por unidade de massa relativamente baixa	

Fonte: Leite (2014)

O efeito do ambiente externo nos componentes estruturais sempre é uma preocupação durante a sua fabricação devem atender aos requisitos de peso, elasticidades, resistência à fadiga e resistência a corrosão. O alumínio é um material que ao entrar em contato com o oxigênio produz um filme natural protegendo o metal contra a corrosão, onde a camada de oxido não permite que os elétrons produzidos pela oxidação atinjam o substrato do metal evitando assim que ocorra o processo de corrosão (LEITE, 2014).

O alumínio puro apresenta boa flexibilidade, mas possui baixas propriedades mecânicas, não sendo muito atrativo para a fabricação de estruturas, como por exemplo na construção de aeronaves. Com isso as ligas de alumínio foram desenvolvidas para aumentar

suas propriedades mecânicas, sendo divididas em dois grupos, o grupo das ligas trabalhadas e o grupo de ligas forjadas. Sendo agrupadas em séries, cada liga dentro de uma mesma série é identificada por um sistema de quatro dígitos (ZANGRANDI, 2008; LEITE, 2014;). Na Tabela 2 é apresentado a classificação das ligas de alumínio.

Tabela 2 - Divisão das ligas de alumínio.

SÉRIE	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	PRINCIPAIS APLICAÇÕES
1xxx	Al comercialmente puro	Contatos elétricos, Alclad
2xxx	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria Aeronáutica
3xxx	Al Mn e Al-Mn-Mg	Latas de Bebidas, Painéis...
4xxx	Al-Si	Metal de Adição para soldas, Pistões forjados de motores.
5xxx	Al-Mg	Aplicações Náuticas (navios e barcos)
6xxx	Al-Mg-Si	Perfis Arquitetônicos
7xxx	Al-Zn	Indústria Aeronáutica
8xxx	Al-Sn	Várias

Fonte: Zangrandi (2008).

As ligas de alumínio avançadas mais utilizadas para as peças de aeronave são as ligas do grupo 7xxx que possuem alta resistência à tração e boa tenacidade, onde geralmente são utilizadas em formato de chapas grossas devido a sua menor sensibilidade ao resfriamento. Também são muito utilizadas as ligas do grupo 2XXX onde esse grupo possui alta resistência e tolerância a danos (RACHID et al., 2015).

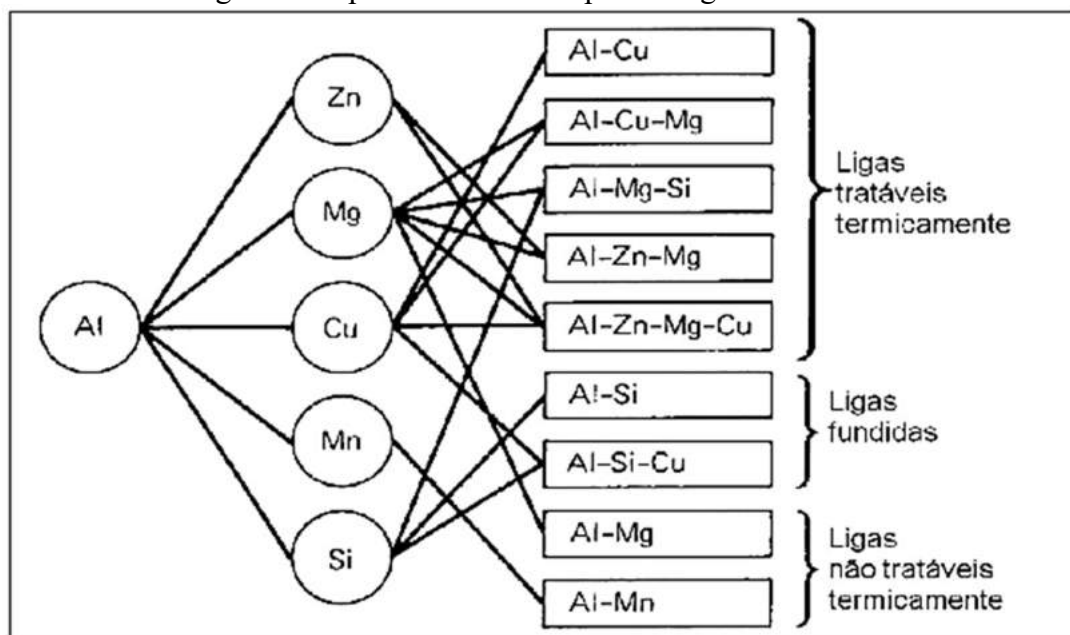
O grupo 2xxx é a liga de alumínio que contém em média, os elementos como o cobre (4%), magnésio (1,5%), manganês (0,5%), silício (0,3%) e ferro (0,2%). Esse tipo de liga é perfeito para estruturas que devem possuir alta resistência à fadiga, como por exemplo, as partes inferiores das asas, que sofre grande fadiga devido à tração. Nessa classe vem sendo utilizado o processo de envelhecimento natural, onde esse desempenho traz grandes vantagens nas propriedades desse material, fazendo com que haja um aumento na resistência à fadiga, e à propagação de trincas. Verificou-se que com a adição mais elevada de magnésio o material envelhece com propriedades mecânicas melhores. Estes tipos de liga possuem 4,5 % de cobre, 1,5% de magnésio e 0,6% de manganês e o restante de alumínio (LEITE, 2014; RACHID et al., 2015).

2.1.1 Tratamento das ligas de alumínio

A escolha de uma liga para determinados processos é muito em função da sua família e seu principal elemento de liga, onde sua composição química obedece a Norma ABNT NBR 6834 (2000), por essas informações são possíveis descobrir suas melhores características para o seu uso

Com base em seu processo de fabricação e suas características, as ligas de alumínio são divididas em dois grupos, trabalháveis/dúcteis e ligas fundidas. As ligas trabalháveis são aquelas que sofrem deformação plástica a quente e a frio por meio de laminação ou extrusão (CASTRO, 2018). A Figura 1 ilustra os grupos de ligas que são e não são tratáveis termicamente.

Figura 1– Tipos de tratamento para as ligas de alumínio



Fonte: Adaptado de Castro (2018)

Para classificar o tipo de tratamento térmico realizado, sua identificação vem logo após o número de série da liga, mostrando o tratamento térmico ou mecânico realizado. A Tabela 3 lista os tipos de tratamentos realizados para o alumínio.

Tabela 3- Tratamento das ligas de alumínio

Símbolo	Significado do tratamento
F	<i>Conforme Fabricada.</i> Indica que não houve nenhum controle especial sobre os parâmetros térmicos do processo a quente, a frio ou sobre as condições de endurecimento.
O	<i>Recozida.</i> O Produto foi tratado termicamente para se obter os menores valores de resistência mecânica.
W	<i>Solubilizada.</i> Condição instável atingida após o resfriamento rápido da liga. Aplica-se somente às ligas endurecíveis por envelhecimento natural (temperatura ambiente) sendo que o tempo de envelhecimento deve estar indicado.
T	<i>Tratada Termicamente (Têmpera).</i> As propriedades do produto (pós-solubilização) foram estabilizadas por processos diferentes de “F” ou “O”. O tratamento T é sempre seguido por um dígito de 1 a 10, diferenciando os diferentes tratamentos.

Fonte: Zangrandi (2008).

2.1.2 Liga de alumínio AA 2024-T3

A liga 2024-T3 é a liga que apresenta o cobre como seu principal elemento, também tendo o magnésio como elemento secundário. Esse material vem sendo muito utilizado pela indústria aeronáutica por apresentar uma boa resistência mecânica e também uma boa relação entre resistência/peso. A Tabela 4 apresenta os elementos químicos presentes nessa liga.

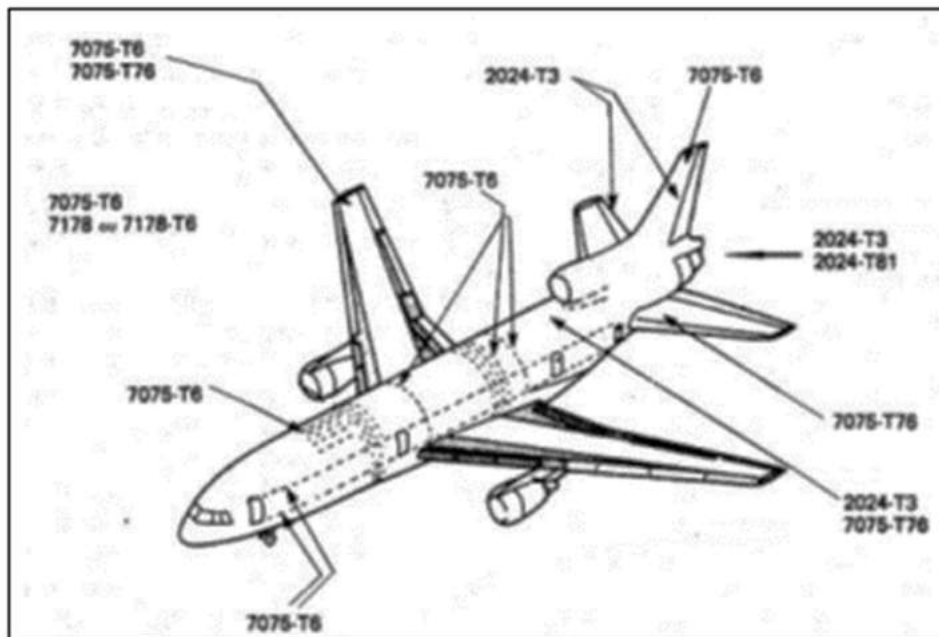
Tabela 4 - Elementos de liga presente no AA 2024-T3

Elemento	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr
% m/m	92,15- 93,5	4,4	1,5	0,6	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,25	≤ 0,1

Fonte: Adaptado de Petersen (2016).

As propriedades mecânicas dessa liga podem ser superiores a dos aços com médio teor de carbono. Placas de alumínio AA2024 são bastante utilizadas em falanges e asas aeronaves, local onde rigidez, bom desempenho à fadiga e boa resistência mecânica são necessários. A Figura 2 apresenta as áreas onde esse material é utilizado numa aeronave (JUNIOR, 2011).

Figura 2 - Locais onde são utilizados o AA2024 T3 em uma aeronave.



Fonte: Domingues Junior (2011).

Sua boa resistência é devido à adição do seu principal elemento de liga, o cobre (Cu), onde se formam pequenos precipitados (Al_2Cu) finamente dispersos e coerente com sua matriz por processo de envelhecimento controlado. Os precipitados além de fornecer boas propriedades mecânicas, também são responsáveis pela sua corrosão, pois induzem processo galvânico em sua estrutura. Em meios aquosos contendo cloreto a deformidade da camada de óxido pode fazer com que sua superfície fique mais vulnerável à corrosão (JUNIOR, 2011; QUEIROZ, 2008).

Apesar de sua boa resistência essa liga geralmente requer a necessidade de tratamentos superficiais para suas aplicações práticas, sendo susceptível a corrosão decorrente de suas partículas intermetálicas que apresentam potenciais mais anódicos que sua matriz. O alumínio AA 2024-T3 possui três fases intermetálicas principais, sendo essas Al_2CuMg (fase S), Al_2Cu e $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$. $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, apresentando partículas de Al, Cu e Fe como composição principal;

Mn e Si como partículas menores encontradas nessas partículas (PRAKASHAIAH et al., 2018; HASHIMOTO et al., 2016)

2.2 COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

Os compósitos são uniões de materiais projetados para mostrar as melhores características de cada material que o compõe. Por apresentarem bom desempenho os compósitos estruturais vêm substituindo componentes metálicos, sendo utilizados em vários tipos de indústria tais como aeroespacial, petroquímica, naval entre outros. No setor aeronáutico a substituição de peças metálicas por compósitos geralmente é associada com a redução de peso, maior resistência à corrosão e à fadiga e na fácil obtenção de peças com geometria mais complexas. Em uma aeronave a substituição do alumínio por material compósito permite a redução do seu peso em cerca de 25 %, podendo gerar uma economia de 25% do custo final na obtenção das peças (OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009; LEITE, 2014). A Tabela 5 mostra a vantagens da utilização desse material na indústria aeronáutica.

Tabela 5 - Vantagens da utilização de materiais compósitos.

Vantagens Materiais Compósitos	Desvantagens
Menos densos.	Mais caros.
Resistência à corrosão.	Restrita quantidade de dados estabelecidos e confiáveis de projetos e sem serviço.
Resistencia à fadiga.	Corrosão dos prendedores metálicos.
Mínima usinagem requerida.	Degradação em ambientes suficientemente úmidos e quentes.
Seções e contornos complexos facilmente fabricados.	Relativamente baixa resistência a impactos.
Orientação preferencial da resistência e rigidez nas direções necessárias.	Requer proteção contra descargas elétricas.
Número reduzido de montagens e de prendedores.	Métodos de inspeção complexos e caros.
Absorvem micro-ondas de radar	Imprecisão na detecção de defeitos de colagem.
Expansão/contração térmica próximas de zero	Imprecisão na localização de defeitos.

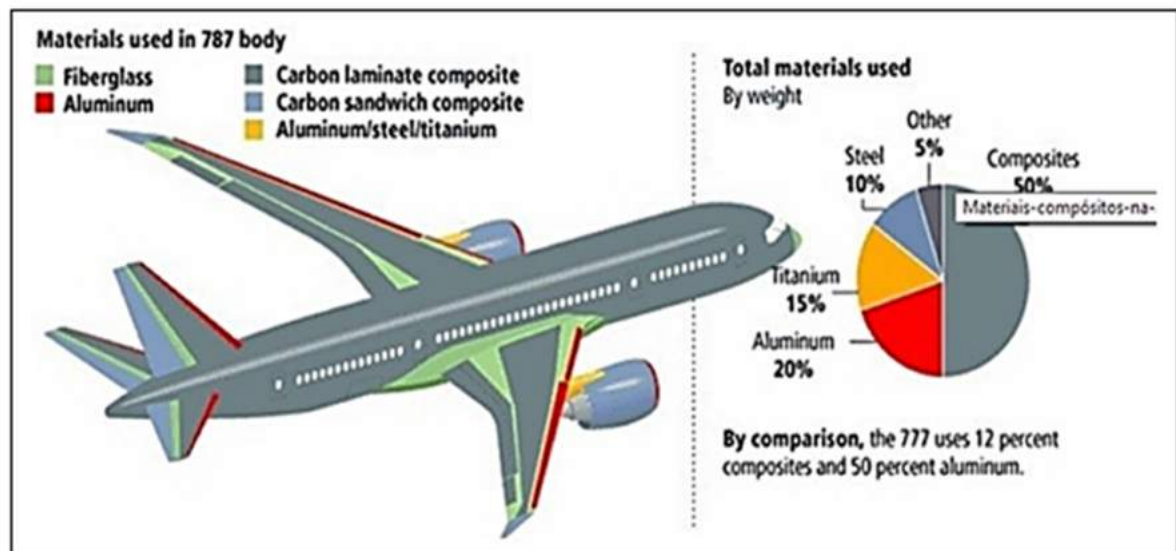
Fonte: Leite (2014).

As vantagens da utilização destes materiais são diversas, podendo se adaptar aos vários tipos de *layouts* e ainda sim mantendo boa resistência à fadiga, à corrosão e apresentando uma vantagem muito conveniente para o setor aeroespacial: compósitos têm a capacidade de atenuar vibrações. Desta forma o uso destas peças no setor aeroespacial é no sentido de aumentar a resistência à fadiga, na diminuição de peso das e na reintegração de partes das aeronaves, visto que é previsto que até 2030 o crescimento de entrega de novas aeronaves gira em torno de 3,6 % (KAPPMAYER et al., 2012; KLOCKE et al., 2015; LEITE, 2014; VENTURA, 2009).

No decorrer do avanço tecnológico os materiais poliméricos ganharam espaço muito por causa dos usos das fibras de vidro, carbono e aramida usadas na fabricação dessas estruturas. O desempenho dos componentes dos aviões irá depender do local em que estará atuando, como por exemplo, as asas, onde é um local de alta carga de carregamento, necessitando assim do aumento de sua resistência estática (REZENDE, 2007). A Figura 3 ilustra a percentagem de compósitos em aeronaves.

Figura 3 - Exemplificação da percentagem dos materiais utilizados na fabricação da aeronave

787



Fonte: adaptado de Leite (2014).

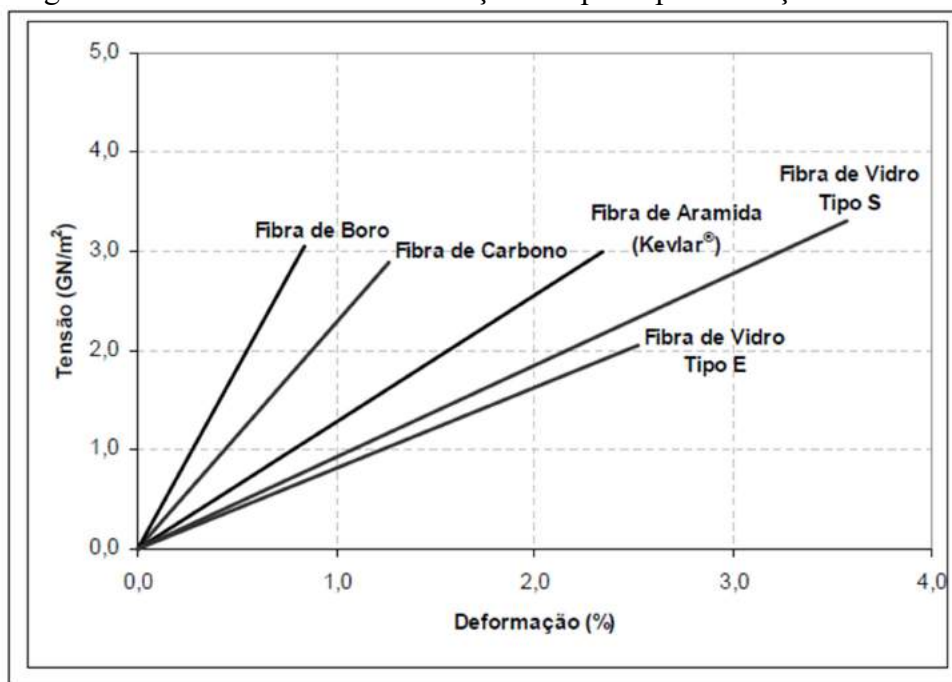
Materiais compósitos são constituídos de um reforço imerso em uma matriz polimérica, sendo os compósitos apresentando composição simples ou complexa. Esses materiais geralmente são fabricados em uma mistura física com fases descontínuas, sendo essas fases presentes em formas de fibras, teias ou partículas e uma fase contínua chamada matriz (SOUSA; KADOTA, 2018).

A matriz desempenha alguns papéis importantes na estrutura do compósito. Uma de suas funções é proteger as fibras de danos superficiais causados por ambientes agressivos ou por abrasão mecânica, também tem a função de evitar a propagação de fraturas frágeis que poderia causar danos catastróficos. A matriz polimérica garante a distribuição de cargas através das fibras, sua facilidade no processamento e sua baixa densidade tornam os compósitos com matrizes poliméricas um dos materiais com maior gama de aplicações (SOUSA; KADOTA, 2018).

2.2.1 Fibra de vidro

Fibras de vidro são os tipos de reforços mais utilizados em matrizes poliméricas, sendo cerca de 90% dos reforços atualmente no mercado. Esse tipo de fibra possui algumas vantagens em comparações com outros reforços, como possuir alta resistência à tração (7 MPa) e uma dureza 3 vezes maior que a do aço, sendo o tipo de reforço mais econômico. Todavia, fibras de vidro apresentam uma baixa adesão a alguns tipos de matrizes poliméricas, baixa resistência à abrasão e seu módulo de elasticidade é relativamente baixo em comparação com as fibras de carbono ou aramida, (MARQUES; 2020). A Figura 4 exibe os valores de tensão e deformação de alguns tipos de reforços.

Figura 4 – Curvas tensão – deformação dos principais reforços utilizados



Fonte: Feltran (2008).

A adição de reforços em materiais termoplásticos tem como objetivo aumentar a rigidez, sua resistência à tração aumenta conforme o volume de fibra na matriz. Volumes acima de 60% de fibra no compósito não asseguram boa molhabilidade da fibra (SOUSA et al., 2016; FELTRAN, 2008; MARQUES, 2020). A Tabela 6 apresenta algumas das propriedades da fibra de vidro-S.

Tabela 6 - Propriedades da fibra de vidro-S.

Propriedades/unidades	Fibra de vidro-S
Densidade (g/cm ³)	2,49
Resistência à tração (MPa)	4585
Módulo elástico (GPa)	85,5
Faixa de diâmetro (µm)	8 – 13
Coefficiente de expansão térmica (10-6/°C)	2,9

Fonte: adaptado de Marques (2020)

2.2.2 Poli (éter-imida)

Este polímero termoplástico foi desenvolvido na década de 70 pela empresa *General Eletrics Inc*, sendo um dos tipos mais conhecidos e antigos plásticos de alto desempenho. Esse material tem uma estrutura amorfa, transparente e de coloração amarelada e apresenta uma elevada temperatura de Transição Vítrea (Tg) (entre 170 e 220 °C), assim como elevados valores de resistência mecânica e rigidez (ALEXANDRINO, 2012). Na Tabela 7 é apresentado as propriedades do PEI.

O material é uma derivação poliamida com ligações flexíveis de carbono e oxigênio em sua estrutura, essa matriz possui unidades imidas aromáticas que elevam a sua rigidez e resistência ao calor. O PEI pertence ao grupo dos polímeros de engenharia e possui propriedades como boa resistência térmica (entre 35 e 160 °C), alto módulo elástico e bom isolamento elétrico, podendo apresentar uma resistividade elétrica de 1017 Ω/cm (ALEXANDRINO, 2012; BARROS, 2004). Na Figura 5 é mostrada a representação química do PEI.

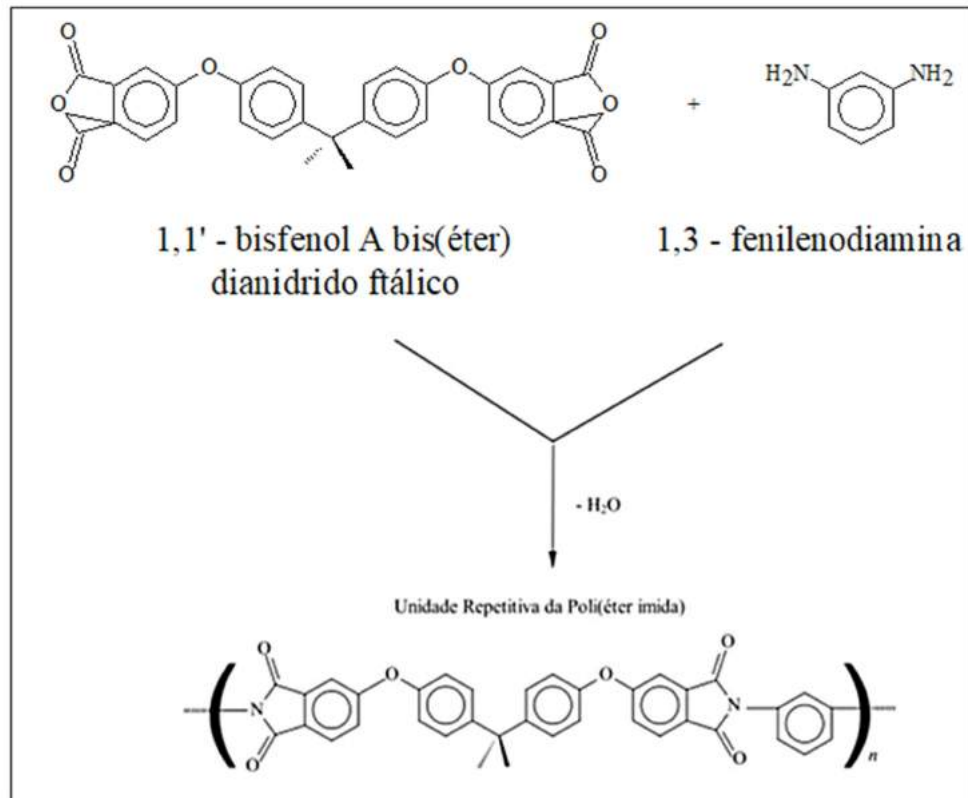
Sua obtenção é a partir da policondensação entre uma diamina aromática e um dianidrido contendo ligações de éter. A unidade imida aromática proporciona resistência mecânica, resistência térmica e rigidez e as ligações de éter promovem flexibilidade às cadeias, permitindo assim o processamento do polímero. Mesmo apresentando boas vantagens em comparação com outras resinas, o PEI pode ser solúvel parcialmente em solventes halogenados e podendo ser atacado por bases fortes. Ao contrário de outros polímeros no campo da engenharia o PEI pode ser facilmente amolecido e conformado em alta escala (OLIVEIRA; GUIMARÃES; BOTELHO, 2009; BARROS, 2004; SOUZA, 2010).

Tabela 7 - Propriedades do Poli (éter-imida) - PEI

PEI - Poli (éter-imida)		
Propriedades Físicas	Densidade (g/cm ³)	1,27
	Absorção de água 24h (%)	0,25
Propriedades Térmicas	Tg (°C)	180-220
	Temperatura de processamento (°C)	>350
	Coefficiente de expansão térmica (x10 ⁻⁵ °C ⁻¹)	5,58
	Condutividade térmica (10 ⁴ cal/s cm °C)	1,6
	Temperatura de deflexão sob carga de 1,82 MPa (°C)	210
Propriedades Mecânicas	Resistência à tração (MPa)	105
	Módulo de elasticidade (GPa)	3
	Resistência ao impacto (J/m)	53
	Elongação na ruptura (%)	60
	Tensão de escoamento (MPa)	104,8

Fonte: Adaptado de Marques (2020).

Figura 5 - Representação química das cadeias do PEI



Fonte: adaptado de Barros (2004).

2.3 SOLDAGENS DE MATERIAIS COMPÓSITOS

O êxito na junção de materiais compósitos pode depender de vários fatores como custo benefício, desenvolvimentos de processos específicos de junção e montagem rápida. A união de compósitos termoplásticos pode ser um processo crítico para a confecção de peças estruturais, podendo criar fragilidades e irregularidades (COSTA, 2011). Junções entre compósitos termoplásticos muitas vezes necessitam de adaptações. A Figura 6 detalha as técnicas de uniões utilizadas para a junção de materiais compósitos.

Figura 6 – Tipos de uniões para compósitos.



Fonte: Costa (2011).

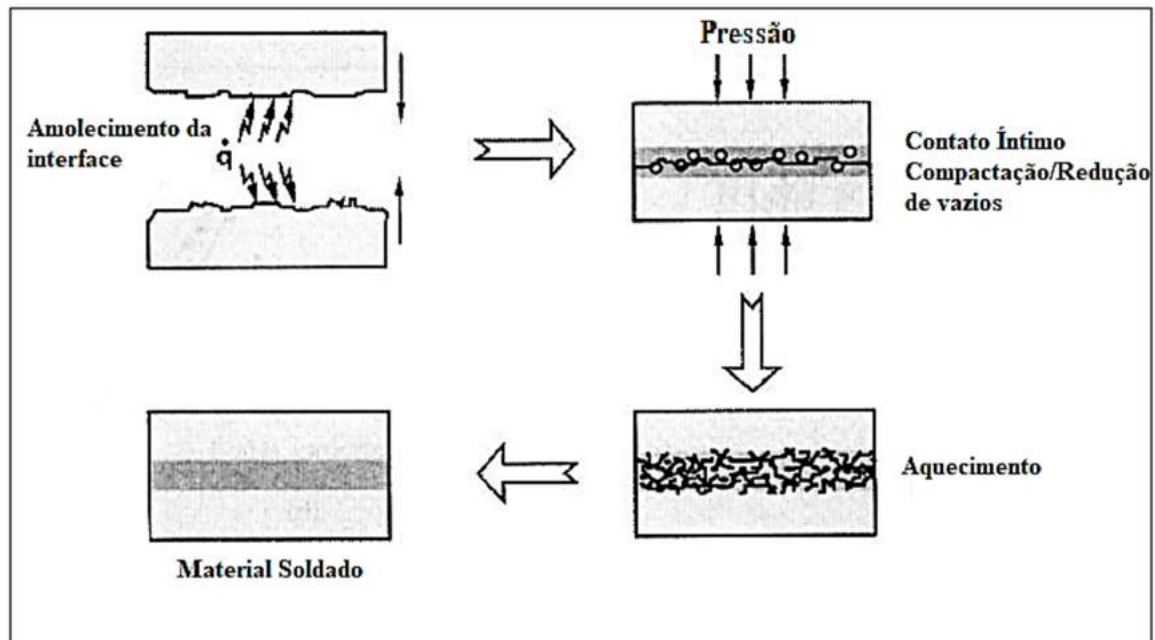
As técnicas de união desses materiais são classificadas como: fixação mecânica, união adesiva e por fusão (soldagem). Os fixadores mecânicos podem apresentar alguns tipos de problemas como acréscimo de peso, corrosão galvânica e concentração de tensões. Outra técnica de união utilizada são os adesivos termorrígidos, porém sua utilização é bastante problemática devido às dificuldades de adesão de sistemas termorrígidos em materiais termoplásticos, além disso a superfície a ser colada necessita de um longo tempo de preparação em ambiente controlado e com longos ciclos de cura (COSTA, 2011; SOUZA, 2013; YOUSEFPOUR et al., 2004).

Dentre os tipos de uniões utilizados a soldagem vem se destacando por apresentar qualidade superior, pois é um processo rápido e exige pouca preparação da superfície a ser soldada. Outras vantagens a serem citadas é que a soldagem, além de ser um processo quimicamente inerte, possibilita a eliminação de tensões residuais resultantes de técnicas de uniões mecânicas e possui maior rapidez em relação às técnicas por uniões adesivas (COSTA, 2011; SOUZA, 2013).

A base da soldagem de materiais termoplásticos, como mostrada na Figura 7, envolvem as etapas de preparação da superfície a ser soldada, o aquecimento da interface do polímero

fazendo seu estado mudar para o viscoso e seu resfriamento (ABRAHÃO, 2015; MARQUES et al., 2010; YOUSEFPOUR et al., 2004).

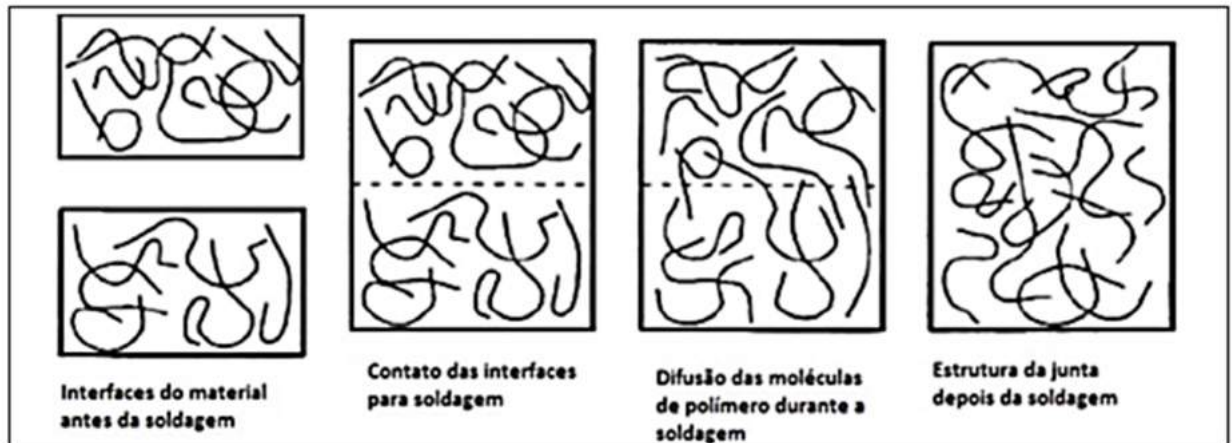
Figura 7 – Ilustração do processo de soldagem de polímeros termoplásticos.



Fonte: Costa (2011).

A junção das partes é devido à aproximação dos átomos das superfícies (Figura 8) em estado viscoso, causando a interdifusão de suas cadeias, obtendo-se desta forma uma fusão uniforme. Esse tipo de união se tornou uma técnica muito promissora utilizada na indústria. A eficácia das peças soldadas adquire um maior número de propriedades de adesão. A união de componentes estruturais termoplásticos se torna necessária diante da limitação do processo de fabricação e a importância de inspeções e reparos na montagem de estruturas complexas (MARQUES et al., 2010; YOUSEFPOUR et al., 2004).

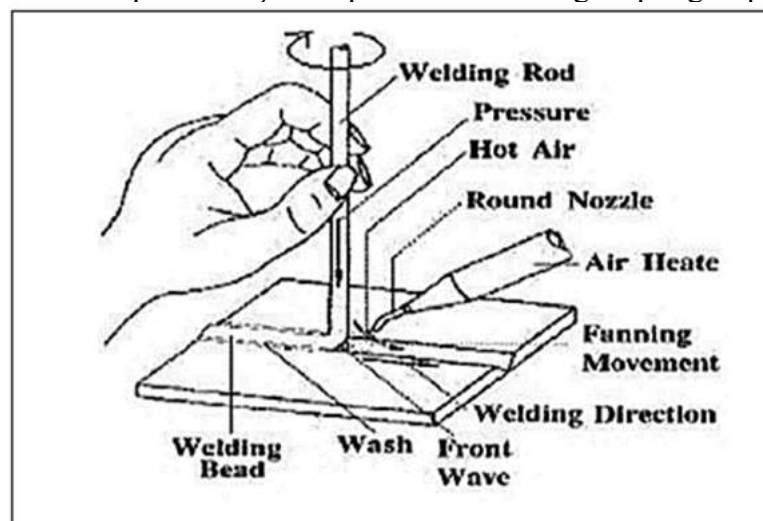
Figura 8 - Exemplo do processo de difusão durante a soldagem.



Fonte: Adaptado de Ageorges et al. (2001).

Um método muito usado para a soldagem de termoplásticos é a soldagem por gás quente (*Hot Gas Welding*), onde o fluxo de gás quente é diretamente dirigido para a junção dos polímeros ocasionando o amolecimento da região e da haste de enchimento sendo consumida durante o processo. O gás quente é direcionado para a junção e a haste soldada utilizando uma pistola de gás quente (Figura 9), fazendo o pressionamento da haste para uma melhor penetração na junta soldada. A haste de adição e o sulco são aquecidos simultaneamente pela ferramenta. Podem ser utilizados vários tipos de gases para a soldagem, por exemplo, nitrogênio, dióxido de carbono e gases inertes (AHAMAD et al., 2016).

Figura 9 – Esquematização do processo de soldagem por gás quente.



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

Esse tipo de soldagem é utilizado para materiais termoplásticos, mas outros materiais vêm sendo soldados por esta técnica como o PVC, polietileno, polipropileno, acrílicos, poliestireno e policarbonato. No processo de união o gás quente amolece os materiais para se fundirem, fazendo o pressionamento da haste em direção as ranhuras. A temperatura do gás durante a soldagem pode variar entre 200 °C e 600 °C (HAQUE; SIDDIQUI, 2016).

Baseado em estudos realizado por Oliveira et al. (2017) foi desenvolvido um dispositivo de soldagem para união de materiais termoplástico PEI/ fibra de vidro. Sua união se dá pelo aquecimento do material através de chama oxiacetileno, fazendo com que haja o amolecimento das interfaces e assim a soldagem. Nesse processo foi alcançada uma resistência mecânica na junta soldada de 10,18 MPa.

Em Cintra et al. (2019) o método de soldagem por oxiacetileno foi utilizado para a soldagem de PEI/ fibra de carbono. Fazendo o controle da altura do maçarico e do tempo de exposição ao calor, através de planejamento experimental, foram alcançados valores de resistência das juntas soldadas de 15,20 MPa e 15,55 MPa. Também foram feitas análises dos vazios gerados após rompimento, mostrando assim a evolução do método de soldagem por chama.

2.3.1 Junções de estruturas híbrida metal–polímero

Estruturas híbridas vêm sendo cada vez mais comuns em diversos setores industriais, tais como automobilístico, naval e aeronáutico. Essa versatilidade se deve ao fato da junção metal–polímero apresentar um melhor desempenho, boa redução de peso e de custos em comparação ao uso de materiais estruturais convencionais, como por exemplo, o aço. Muitos estudos vêm sendo desenvolvido para melhorar as junções onde se encontra a maior dificuldade devido à diferença química e física entre os metais e polímeros (SÔNEGO, 2016; AMANCIO, 2011).

Este tipo de junção se baseia na interação entre dois ou mais componentes, fazendo um sistema de ancoramento superficial entre si. Uma das principais vantagens deste tipo de união é que as peças só necessitam de compatibilidade geométrica não precisando de compatibilidade química. Técnicas de união híbrida vêm sendo requerida em diversas etapas da produção de estruturas, por isso o aprimoramento dos tipos de união existentes e o desenvolvimento de novas vêm sendo motivo de intensas pesquisas (AMANCIO, 2011; ANDRÉ et al., 2016).

Segundo Borges (2013) um dos maiores desafios para este tipo de união é a diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais. Com o passar do tempo isso resulta no relaxamento da junta, onde após um número definido de ciclos ocorre falhas na junção devido à fadiga decorrente das aplicações sob carregamento combinado, termomecânico. Há outros fatores a serem considerados quando o processo de união envolver aquecimento ou fusão, como por exemplo, pontos de fusão/transição diferentes.

A diferença de propriedades térmicas específica de metais e polímeros como pontos de fusão/transição diferentes, que tornam o resfriamento e o aquecimento dos materiais ocorram em temperaturas distintas, podendo assim gerar degradação térmica no polímero em temperaturas muito elevadas ou o resfriamento brusco do metal pode acarretar a separação da junta durante a consolidação. Pode haver também baixa miscibilidade devido a diferentes energias de coesão, sendo que a difusão na interface pode ser prejudicada visto que o metal tende a formar *clusters* esféricos quando dissolvidos em matriz poliméricas fazendo que a união seja prejudicada (BORGES,2013).

As junções destes elementos geralmente ocorrem através de técnicas como colagem adesiva, fixadores mecânicos (rebites). Esses métodos apresentam desvantagens como dos fixadores mecânicos em que a perfuração causa uma redução na capacidade de carga do material devido às tensões e delaminação, outro problema causado é a aceleração da corrosão galvânica no metal (LIONETTO; BALLE; MAFFEZZOLI, 2017).

A colagem adesiva por sua vez apresenta algumas desvantagens como necessidade de uma boa preparação de sua superfície, cura longa e suscetibilidade a intempéries. Devido a isso muitas técnicas de soldagem vêm sendo desenvolvida para componentes híbridos, sendo que essas técnicas de soldagem se baseiam na capacidade de amolecimento e posteriormente no resfriamento dos compósitos termoplásticos sem qualquer alteração em sua estrutura (LIONETTO; BALLE; MAFFEZZOLI, 2017).

Reis (2017), aplicou o método de soldagem por chama na união de materiais híbridos (metal-polímero), fazendo a junção do compósito PEI/ fibra de vidro com a liga AA2024 T3 sem anodização, utilizando como fonte de calor o GLP e um maçarico de soldagem para oxiacetileno. Para a soldagem foi utilizado uma distância de 20 mm e um tempo de 5 minutos, a região soldada foi analisada e foi verificada houve degradação dos materiais, que a junção pode ser possível através do método oxi-gás, com algumas adaptações. Posteriormente, Reis (2018) realizou a otimização do processo de soldagem trocando o maçarico e por meio de planejamento experimental, fazendo-se o controle do tempo de exposição da área a ser soldada e da distância do maçarico até o material, alcançando a condição de tempo 105

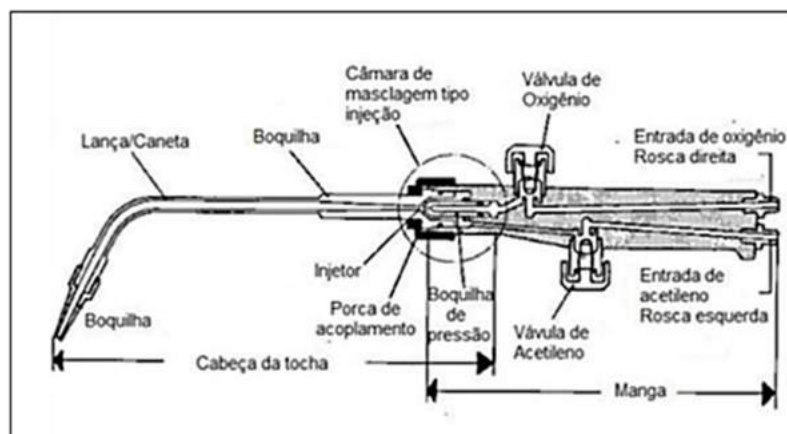
segundos e distância do maçarico de 35 mm. Neste processo foi alcançado um valor resistência à tração de 6,91 MPa, na região soldada.

2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM POR OXI-COMBUSTÍVEL

O processo de soldagem oxi-combustível ou *Oxi-Fuel Welding* (OFW) é um método de soldagem por fusão que utiliza o calor de uma chama resultante da queima de um gás combustível juntamente com o oxigênio. A chama é direcionada através de um maçarico, onde é feito o controle da vazão dos gases podendo haver ou não material de adição (MARQUES et al., 2009; WAINER et al., 1992).

O sistema de soldagem por oxi-gás é um dos mais amplamente utilizados na indústria por apresentar baixo custo operacional e de equipamentos, e também, por apresentar um sistema simples constituído por cilindros de gases, reguladores de pressão com manômetro, válvulas de retenção e uma tocha de soldagem com bico adequado. A Figura 10 mostra a representação de um maçarico para a soldagem. Há uma grande variedade de gases usados nesse tipo de soldagem, sendo o mais usado o acetileno, mas outros gases combustíveis também são utilizados, dentre eles o butano, propano, metano, etileno entre outros (MARQUES, 2020).

Figura 10 - Representação do sistema de vazão e controle dos gases e produção da chama.



Fonte: Marques (2020).

Esse tipo de soldagem vem sendo adaptada para união de materiais compósitos, onde vem se apresentando como uma alternativa fácil e barata. A adaptação deste tipo de soldagem para materiais poliméricos vem ganhando várias adaptações através de pesquisas realizadas.

A primeira adaptação deste método para soldagens de PEI/fibra de vidro foi realizada por Oliveira et al. (2017), utilizando como gás combustível o acetileno juntamente com o oxigênio, sendo utilizado uma chama neutra. Para que não houvesse a degradação do compósito e a dissipação do calor foi utilizado um dispositivo composto por um tijolo refratário e metal para fixação, também foi adaptado um dispositivo para a regulação da distância entre o bico do maçarico e o material. A Figura 11 mostra o sistema de soldagem desenvolvido.

Figura 11 - Dispositivo desenvolvido para soldagem



Fonte: Oliveira et al. (2007).

Vários estudos vêm sendo desenvolvidos a partir deste dispositivo. Cintra et al. (2019; 2020) utilizaram este método na soldagem PEI/fibra de carbono e foi avaliada a qualidade das juntas submetidas a condicionamentos ambientais. Em Marques (2020) foi avaliado o tipo de fratura nas juntas soldadas de PEI/fibra de vidro. Como desdobramento deste tipo de soldagem, em Reis (2017) foi empregado a soldagem oxi-combustível visando à junção híbrida entre metal-polímero, onde foi realizada a soldagem entre o PEI/Fibra de vidro e a liga AA2024 T3, utilizando a combustão do GLP (gás liquefeito de petróleo) ao ar, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Equipamento de soldagem (gás GLP) utilizado para a junção metal-compósito.



Fonte: Reis (2017).

Na soldagem entre a liga de alumínio e o compósito, a chama é aplicada diretamente na superfície da liga de alumínio (Figura 13), fazendo-se o controle da altura do maçarico e o tempo de exposição da região a ser soldada. Para que o compósito não ficasse aderido na proteção de alumínio foi usado um desmoldante.

Figura 13 - Processo de soldagem por oxi-combustível.



Fonte: Reis et al. (2018).

Ao se direcionar a chama à liga de alumínio ocorre a transferência de calor, fazendo com que se atinja uma temperatura acima da transição vítrea da matriz polimérica havendo seu amolecimento e a junção entre o compósito e a liga. Para que haja contato em toda

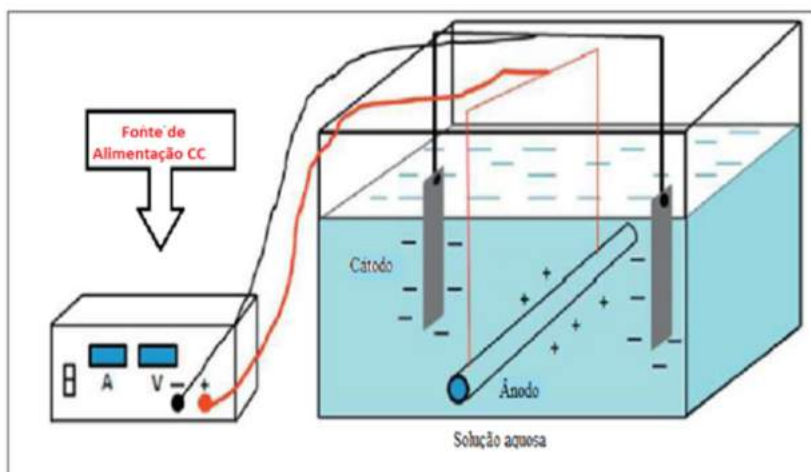
extensão das superfícies da liga e do compósito, é necessário o uso de um dispositivo que exerça pressão uniforme nos materiais, sendo sua regulação feita através de aperto manual.

2.5 ANODIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA2024

O processo de anodização do alumínio é um método eletroquímico que ocorre em meio aquoso onde há a formação de uma camada de óxido (Al_2O_3) em sua superfície, obtendo-se assim uma camada mais espessa que a formada naturalmente. Esse tipo de tratamento é muito comum para ligas da família 2XXX (Al-Cu-Mg) e 7XXX que são comercialmente utilizadas no setor aeronáutico. Nesse processo o alumínio funciona como ânodo e outros metais funcionam como cátodo, uma corrente elétrica é aplicada no material havendo assim um crescimento da película de óxido (CAMARGO, 2007; CASTRO, 2018).

Nesse tratamento se consegue um bom ancoramento em sua superfície, mas sua elasticidade se torna pequena, enquanto a resistências à corrosão e ao desgaste aumentam. Através do controle de parâmetros de tempo e tensão aplicada pode-se modificar a espessura do óxido produzido, podendo variar de 20-40 μm até 200 μm , ou valores maiores (CAMARGO, 2007). A Figura 14 ilustra o processo de anodização.

Figura 14 – Ilustração do processo de anodização



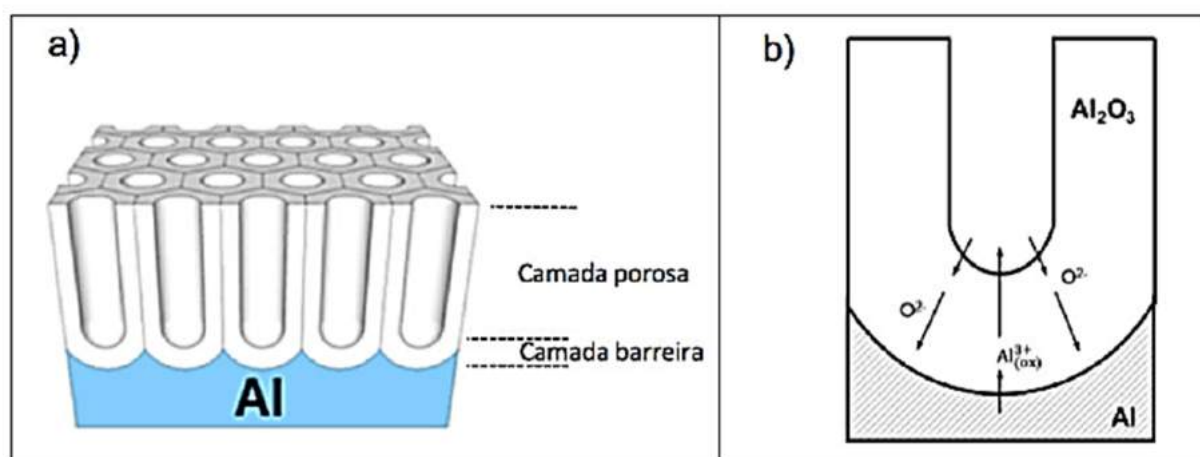
Fonte: Adaptado de Sarhan; Zalnezhad; Hamdi (2013)

Como explicado por Dick (2017) a estrutura dos filmes apresenta duas formações; um filme anódico compacto conhecido como camada barreira formado em eletrólitos com pH 5-7, apresentando um óxido nessa camada, praticamente, insolúvel. Outra estrutura formada é o crescimento de um filme mais poroso e mais espesso que a camada compacta, sendo essa

estrutura formada por poros cilíndricos empilhados hexagonalmente, como pode ser observada na Figura 15 (a).

De maneira geral, a morfologia dos óxidos formados durante a anodização podem apresentar diferentes aspectos dependendo principalmente do eletrólito utilizado. Durante o surgimento da camada porosa, o óxido cresce na interface entre o substrato e o óxido através da migração de íons O^{2-} e OH^- pertencentes à camada barreira, estimulado pelo campo elétrico no fundo dos poros, enquanto os íons Al^{3+} movem-se em sentido oposto, dos poros para a solução (DICK, 2017). A Figura 15 (b) ilustra este mecanismo.

Figura 15 - (a) Estrutura das camadas barreira e porosa; (b) Ilustração do transporte de íons.



Fonte: Adaptado de Dick (2017).

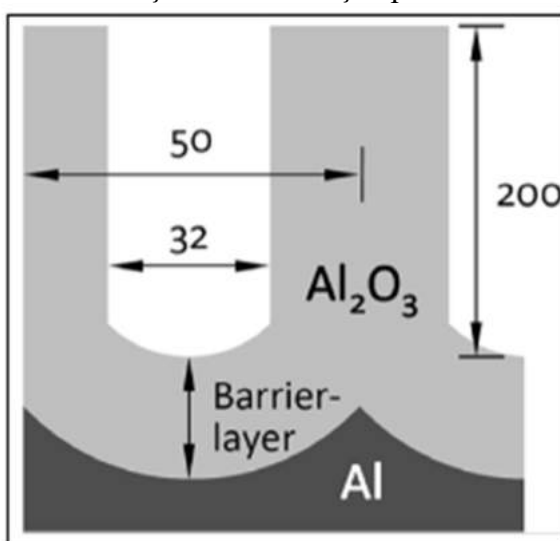
Este tipo de tratamento é muito utilizado na indústria aeronáutica visando melhorar a proteção contra a corrosão no metal. Os processos mais utilizados nesse setor são a anodização crômica (CAA), fosfórica (PAA) e sulfúrica (SAA). Entretanto a utilização destes elementos pode ser perigosa e não muito vantajosa, pois na anodização crômica está presente o $Cr(VI)$; elemento tóxico e cancerígeno, enquanto a sulfúrica causa a diminuição da resistência à fadiga no alumínio não sendo utilizado em ligas de alta resistência, em peças estruturais. O impacto ambiental causado por esses elementos vêm sendo uma preocupação, com isso novos tipos de processo de anodização estão surgindo, como por exemplo, o banho sulfúrico-bórico (BSAA). Estudos realizados por Domingues et al. (2003) mostraram os resultados deste tipo de banho em comparação com o sulfúrico e com o crômico, onde o autor cita que estes banhos não conduzem a uma degradação das propriedades de fadiga da liga de alumínio, que é a maior desvantagem do processo sulfúrico tradicional. Outros banhos têm

surgido como alternativa aos atuais, como o fosfórico- sulfúrico (PSA) e a anodização sem cromato (NCA) (PARK et al., 2001).

Com o objetivo de proporcionar à superfície do alumínio maior rugosidade, o tratamento de anodização vem sendo utilizado nos laminados fibra-metal (FML) para se conseguir uma maior adesão entre as interfaces. Esses ácidos são os métodos químicos mais comuns em laboratório para se aumentar a aderência. Ao sofrer os ataques químicos uma nanoestrutura porosa é formada fazendo com que haja a infiltração do polímero na estrutura fornecendo boa adesão entre o metal e o polímero (AGHAMOHAMMADI et al., 2018). Nos estudos realizados por Jothi et al. (2020), verificou-se que a camada produzida por anodização sulfúrica sobrea a liga AA 2024 T3 melhora a aderência do revestimento de resina epóxi à base de éter diglicídico de bisfenol ao substrato, aumentando a proteção da superfície contra a corrosão, em solução de NaCl 3,5 %.

Ao contrário dos outros banhos, o ácido fosfórico vem sendo um dos mais utilizados nesse setor, a estrutura de óxido formada é altamente porosa, apresentando poros de aproximadamente 32 nm de diâmetro e uma camada barreira fina, com cerca de 10 nm, como mostrado na Figura 16. A espessura da camada de óxido pode variar de aproximadamente 200 a 400 nm. Sua estrutura demonstra fortes forças capilares fazendo com que o polímero seja puxado para dentro dos poros formando uma interfase de intertravamento muito forte (PARK et al., 2010).

Figura 16 - Ilustração da anodização por ácido fosfórico.



Fonte: Adaptado de Park et al. (2010).

2.6 CORROSÃO DA LIGA AA2024 T3

O alumínio é um metal bastante ativo, com potencial padrão de redução de -1,66 V, em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio (EPH), sendo este potencial bastante negativo em comparação aos outros elementos de liga, como é mostrado na Tabela 08. A excelente resistência do alumínio à corrosão se deve à estabilidade da camada passiva fortemente aderida à superfície, formada pelo seu óxido que, quando se encontra em temperatura ambiente, apresenta uma espessura de cerca de 5 nm e é praticamente insolúvel em soluções de pH 4 a 9. Quando o alumínio é exposto em ambientes onde o filme passivo é solúvel, ocorrerá a degradação da camada, resultando na corrosão do material (DICK, 2017).

As ligas do grupo 7xxx e 2xxx são vastamente utilizadas na indústria aeronáutica, como na fabricação de asas, revestimento de fuselagens e em componentes estruturais. O mecanismo de corrosão destas ligas também é similar, originando partículas de fase S, fazendo com que tenham comportamento catódico em relação à matriz (DICK, 2017).

Tabela 8– Potenciais de eletrodo padrão em condição ambiente, a 25°C.

Reação de eletrodo	Potencial padrão vs. SHE (V)
$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	0,52
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,44
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,76
$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$	-1,18
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,66
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,37

Fonte: Adaptado de Dick (2017).

As ligas da família 2xxx e 7xxx apresentam comportamentos eletroquímicos diferentes do alumínio puro, havendo a formação de fases secundárias, com precipitação destes elementos durante o processo de envelhecimento. As ligas do grupo 2xxx não possui uma resistência muito boa à corrosão em comparação com outras ligas. Em determinadas condições elas se tornam suscetíveis à corrosão intergranular (DICK, 2017; MORETO, 2012)

As ligas de alumínio-cobre podem sofrer corrosão por fatores como a diferença de potencial entre a matriz e seus precipitados, surgimento de células galvânicas decorrentes de depósitos de cobre e, em alguns casos, a heterogeneidade da composição química da solução sólida. O mecanismo de corrosão da liga AA 2024 T3 associa “clusters” metálicos ricos em cobre (Cu^0 e Cu^{2+}), provenientes do produto de corrosão, ao efeito de polarização anódica da

fase S (Al_2CuMg) no entorno da fase matriz de alumínio (BUCHHEIT et al., 2000; PETERSEN, 2016).

A fase S pode compor cerca de 61,3 % da liga (Tabela 9), sendo composta por partículas intermetálicas que podem apresentar tamanho médio de 5 μm , podendo chegar até 30 μm , evidenciando que essa fase exerce um papel complexo no processo de corrosão do alumínio. Estudos eletroquímicos por Buchheit et al. (2000) mostram o comportamento catódico desta fase em comparação com a matriz, fazendo ao redor zonas pobres em cobre e formação sítios de cobre, tais fatores tornam o material suscetível à corrosão por pite (PALOMINIO, 2007; TAMBORIM, 2009).

Tabela 9 - Distribuição das partículas na liga AA2024 T3.

Tipo de partícula	Número percentual	Área percentual
Al_2CuMg	61,3	2,69
$\text{Al}_6(\text{Cu,Fe,Mg})$	12,3	0,85
$\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$	5,5	0,17
$(\text{Al,Cu})_6\text{Mn}$	4,3	0,11
Indeterminados	16,9	0,37

Fonte: Adaptado de Tamborim (2009).

A corrosão por pite nesta liga de alumínio pode ocorrer em três estágios: quebra do filme passivo, crescimento de pites metaestável e crescimentos de pites maiores estáveis (TAMBORIM, 2009). Vários estudos tratam deste tema, como o realizado por ZHANG e FRANKEL (2000) que estudaram o comportamento e a dinâmica da corrosão no alumínio, verificando a suscetibilidade do pite progredir para corrosão intergranular dependendo das orientações dos contornos de grão.

2.7 CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO

Os compósitos poliméricos quando expostos a diversos tipos de carregamento mecânicos e condicionamentos ambientais, sendo os mais comuns esforços que atuam em sua estrutura como cisalhamento, compressão e tração. Os principais agentes atmosféricos que causam danos no compósito são umidade relativa do ar, temperatura, raios ultravioletas e água

salina. São nessas condições que os compósitos estruturais geralmente costumam atuar (CUNHA et al., 2006).

No processo de condicionamento higrotérmico há o envelhecimento do material, sendo que esse envelhecimento pode ser de duas classes: físico e químico. No Envelhecimento químico é apresentada uma degradação irreversível das cadeias moleculares, sendo uma consequência disso alterações de sua densidade de reticulação e cisão das cadeias poliméricas. O envelhecimento físico é conhecido como reversíveis é associado às propriedades de mudanças físicas e dimensionais do material (HU et al., 2014; ODEGARD; BANDYOPADHYAY, 2011).

A polaridade tem grande influência na absorção de água pelo compósito, quanto maior a polaridade maior a absorção de água. Além dessas interações, a configuração da molécula de resina também tem influência na absorção de água. Diferentes configurações podem resultar em uma estrutura mais aberta, facilitando a absorção de água (CUNHA et al., 2006).

Com a presença e a difusão de água na matriz polimérica pode ocorrer a degradação do material compósito, sendo pela indução do processo de degradação hidrolítica, fazendo com que haja a plasticização das cadeias poliméricas em grupos funcionais de natureza polar e haja perdas em sua resistência à compressão e de cisalhamento interlaminar. A interface matriz-reforço também pode ser afetada pela difusão de umidade em seu interior pelas suas vias capilares, originando o crescimento de trincas internas. A presença de vazios e microtrincas podem ser mecanismos concentradores de umidade (COSTA et al., 2011; YILMAZ; SINMAZCELIK, 2010).

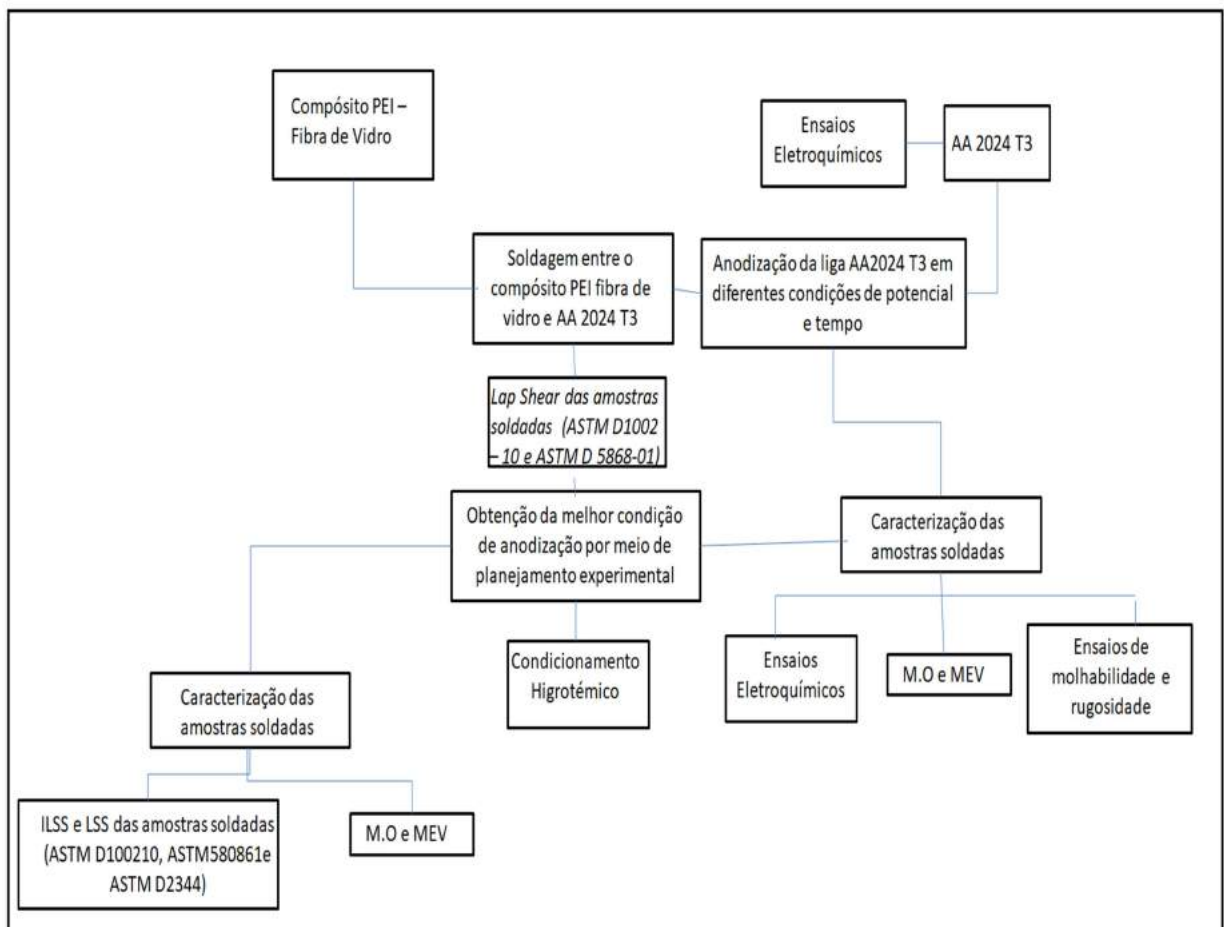
A difusão é agravada com a elevação da temperatura. Esse aumento gera uma expansão volumétrica do polímero criando variações dimensionais no material, criando tensões em seu interior, onde as forças de suas ligações secundárias, como as de Van der Waals, são enfraquecidas diminuindo a dureza do material e aumentando sua ductilidade (DOGAN; ATAS, 2016). A absorção de umidade continuará até o material atingir o equilíbrio Fickiano, sendo que a lei de Fick diz que o fluxo de umidade é proporcional ao gradiente de concentração, às condições de temperatura e às condições de umidade. Seu ganho de massa irá ocorrer em função do tempo de exposição (COSTA, 2011).

Os efeitos combinados da umidade e temperatura geralmente são reversíveis quando o material é exposto por um período curto de tempo, mas quando exposto a longos períodos e ciclos prolongados podem causar danos irreversíveis devido à afinidade de água por grupos funcionais de matrizes poliméricas de natureza polar (CUNHA et al., 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, a liga AA 2024 foi anodizada em diferentes condições de potencial e tempo e caracterizada por técnicas eletroquímicas. Após as soldagens entre o compósito e a liga de alumínio anodizada, por OFW, foram realizados os ensaios de *Lap Shear*, e a aplicação do planejamento experimental, para gerar a melhor condição de anodização (potencial/tempo) e maior valor de resistência à ruptura (variável resposta). Em seguida, as amostras anodizadas foram caracterizadas quanto à morfologia, rugosidade, molhabilidade, entre outros. Apenas as amostras tratadas na melhor condição de potencial/tempo obtida do planejamento experimental foram submetidas a ensaio higrotérmico. Após o período de imersão foram feitos ensaios de LSS e ILSS a fim de verificar se houve perda de resistência mecânica na junta soldada. As etapas para o desenvolvimento deste trabalho são ilustradas na Figura 17 e detalhadas a seguir:

Figura 17: Fluxograma das etapas a realizadas no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Produção do próprio autor

Primeiramente foi realizada a anodização das amostras da liga AA2024 em valores de potenciais de 10, 15, 20 e 30V e intervalos de tempos de 5, 12,5 e 25 min. Depois, foram realizados testes eletroquímicos nas ligas AA2024 sem tratamento (padrão) e nas diferentes condições de anodização, para verificar a resistência à corrosão destes materiais em NaCl 3,5 % (em massa).

Em seguida, foram realizadas as soldagens da liga AA 2024 anodizadas nas diferentes condições de potencial e tempo com o compósito PEI/fibra de vidro, pelo método de soldagem por oxi-combustível. Na sequência, foram realizados testes de *Lap Shear* nas amostras das juntas soldadas para a verificação resistência da tensão de cisalhamento. Com os resultados de *Lap Shear* e aplicação do planejamento experimental foi construída uma matriz experimental, sendo apresentados 13 experimentos, sugerindo várias condições de anodização e os possíveis resultados.

Determinada a melhor condição de soldagem, 10 V/20 minutos com uma resistência de 14 MPa, foram realizados ensaios de *Lap shear* e ILSS, novos ensaios eletroquímicos, ensaios de molhabilidade e rugosidade nas amostras anodizadas. Os ensaios de molhabilidade e rugosidade também foram feitos no material anodizado nas condições preliminares.

O material na melhor condição de anodização e com maior valor de *Lap Shear* determinado pelo planejamento experimental (10V/20min) foi submetido a condicionamento higrotérmico, sendo imerso em água do mar sintética nas temperaturas de 30 °C e 60 °C por 15 dias, para verificar se durante esse período houve comprometimento da junta soldada. Após esse período, as amostras foram retiradas e foi feita sua caracterização mecânica e morfológica.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Compósito

O material termoplástico utilizado para a soldagem foi o compósito PEI/Fibra de vidro TC 1000, processado e fornecido pela empresa holandesa TORAY. Este foi preparado com fibra de vidro do tipo 8HS, apresentando 50% de seu volume em matriz. A especificação deste material é apresentada no Apêndice B. As amostras do laminado PEI/fibra de vidro,

com espessura de 2,5 mm, foram seccionados com dimensão de 100 mm x 25 mm. Amostras deste material é ilustrada na Figura 18.

Figura 18 — Amostas de PEI/fibra de vidro utilizados na soldagem.



Fonte: Produção do próprio autor

3.1.2 Liga de alumínio AA2024-T3

As amostras de liga de alumínio AA 2024-T3 com espessura de 3 mm, foram seccionadas com dimensão de 100 mm x 25 mm, como mostra a Figura 19. O material foi fornecido pela empresa VINER BRASIL. A especificação do material é apresentada no Apêndice A.

Figura 19 – Amostas da liga AA 2024 utilizados na soldagem.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Tratamento de anodização da liga AA 2024

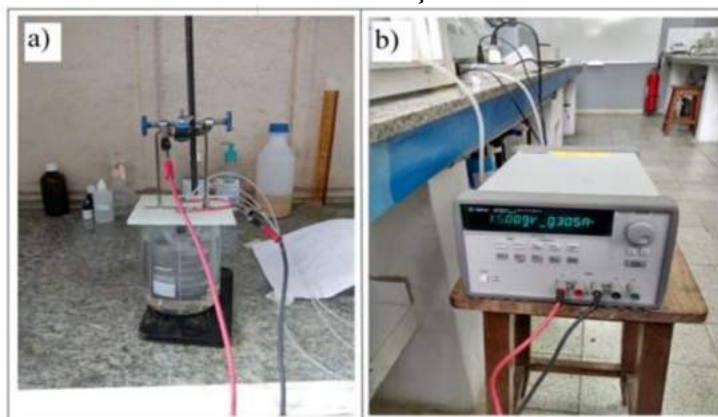
A anodização da liga AA2024 consistiu das seguintes etapas:

A – Limpeza das amostras da liga AA 2024 - lavagem com água e detergente neutro e secagem com jato de ar, em temperatura ambiente, seguida de desengraxe com álcool isopropílico;

B – Decapagem química - a decapagem consistiu na imersão das peças em uma solução de NaOH 10% (em massa), da marca NEON (P.A. 97%), em uma temperatura de 60 °C, por 60 segundos, seguida de lavagem em água deionizada e imersão em ácido nítrico (HNO₃) 35 % (em massa), da marca Dinâmica (P.A. 65 %), para a sua neutralização, durante um período de 90 segundos e, por fim, foi feito o enxague em água corrente, água deionizada, álcool isopropílico e secagem com jato de ar em temperatura ambiente.

C - Anodização – a anodização das amostras da liga AA2024 foram realizadas em uma célula eletrolítica, como esquematizada na Figura 20a. A célula consistiu em um recipiente de vidro, com capacidade de aproximadamente 900 mL, contendo ácido fosfórico, H₃PO₄ 10 % (em massa), da marca Êxodo Científica (P.A. 85%), na qual foram adaptados dois contra eletrodos de aço inoxidável (cátodos) e a amostra da liga AA2024 (ânodo), conectados a uma fonte de alimentação (corrente contínua, CC) AGILENT, modelo E3634A (25 V/7A), como mostrado na Figura 20b. A agitação da solução foi feita por borbulhamento de ar, utilizando-se uma bomba de aquário, como descrito por Santos (2020).

Figura 20 – a) Cuba eletrolítica com os componentes, b) Fonte de alimentação (CC) utilizada na anodização.



Fonte: Produção do próprio autor

As amostras foram anodizadas, variando-se o potencial de 10 a 30 V e intervalos de tempo de 5 a 25 min. Após a anodização, as amostras de liga AA2024 foram lavadas com água corrente, água deionizada, álcool isopropílico e secas com jato de ar em temperatura ambiente. Após o processo as amostras foram colocadas em estufa com temperatura de 60 °C, durante 30 minutos, esta etapa é importante para que ocorra a estabilização da camada de óxido e a remoção de qualquer umidade que haja em sua superfície.

3.2.2 Planejamento Experimental

Para a otimização do processo de anodização foi adotado o estudo estatístico chamado planejamento experimental, que consiste em uma ferramenta essencial para se aprimorar procedimentos e desenvolver novos processos. Para se otimizar um processo é preciso conhecer o número de variáveis independentes a serem estudadas de modo que se tenha uma melhor resposta do sistema a ser estudado (GALDÁMEZ, 2002; ABRAHÃO, 2015; REIS, 2021).

Como mostrado por Wagner (2014) esse tipo de planejamento experimental é feito de forma aleatória para se minimizar os erros, fazendo com que conclusões erradas sejam reduzidas. O planejamento experimental usa metodologia estatística para analisar os dados e prever o desempenho do produto em todas as condições possíveis dentro do limite selecionados, sendo um procedimento para gerar informações com o mínimo de experimentação. Este recurso é uma ferramenta matemática usada para definir a importância do processamento e de suas variáveis do produto, visando como controlá-las para otimizar o desempenho do processo.

Para a determinação das condições de anodização, que resultam em um maior ancoramento entre a liga AA2024 e PEI/Fibra de vidro, foi utilizado um planejamento experimental fatorial completo 2^2 , tendo como variáveis o potencial e o tempo de anodização, respectivamente.

A escolha das condições iniciais de anodização da liga AA2024, neste trabalho, foi feita com base em estudos da literatura (SANTOS, 2020; JOTHY, 2020). Santos et al. (2020) estudaram laminados metal/fibra de carbono/epóxi preparados com a liga AA2024 tratada e sem tratamento de anodização fosfórica. Neste estudo, a condição de potencial foi fixada em 10 V e o tempo de 10 minutos e verificou-se um aumento de cerca de 12 % na resistência ao

cisalhamento em comparação ao material sem tratamento. Jothi et al. (2020) verificaram que a camada produzida por anodização sulfúrica sobre a liga AA 2024, com um potencial de 15 V, por 30 minutos, resulta no maior ancoramento do revestimento de resina epóxi à base de éter diglicídico de bisfenol ao substrato, aumentando a resistência à corrosão, em solução de NaCl 3,5 %.

Com base nesses estudos foram estabelecidas as condições mínimas e máximas para os parâmetros de anodização (potencial e tempo) para a liga AA2024. A Tabela 10 apresenta as condições de anodização mínimas e máximas estabelecidas neste trabalho.

Tabela 10– Condições mínimas e máximas para o processo de anodização.

Potencial mínimo (V)	Potencial máximo (V)	Tempo mínimo (min)	Tempo máximo (min)
10	20	5	20

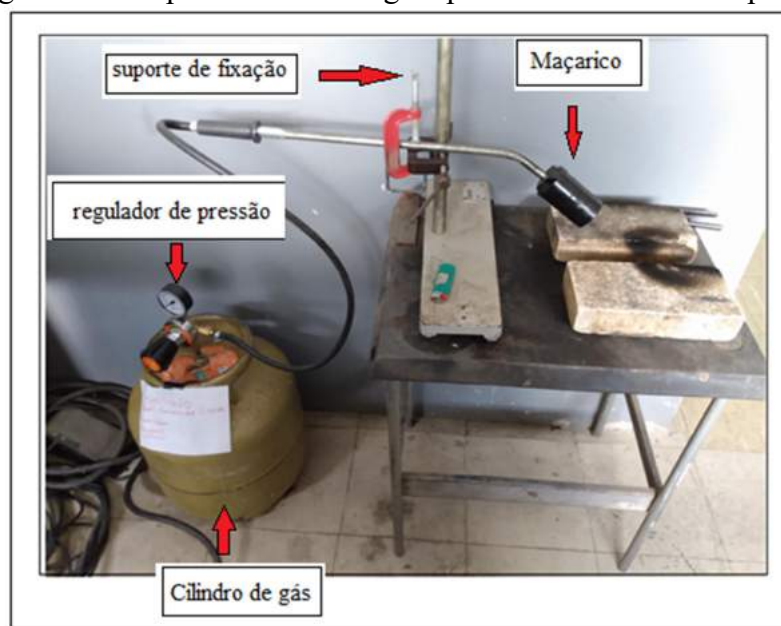
Fonte: Produção do próprio autor

Com os parâmetros mínimos e máximos estabelecidos e com a utilização do software estatístico Design Expert 6.0.6, foi possível determinar as condições experimentais para a realização do processo de anodização. De modo a garantir que o modelo de planejamento experimental seja confiável foi adotado o a análise de variância (ANOVA), avaliando o efeito dos fatores utilizados no tratamento de forma individual (PANNEERSELVAM, 2012; ABRAHÃO, 2015).

3.2.3 Processo de soldagem por oxi-combustível (OFW)

Para a soldagem da liga AA2024 e o compósito foi adaptado o processo oxi-combustível desenvolvido por Reis et al. (2018). O sistema soldagem OFW consiste de um cilindro de gás propano com um regulador de pressão e um maçarico para aplicação da chama diretamente na liga de alumínio, valendo-se da sua excelente condução térmica. O maçarico utilizado foi acoplado em um suporte para a fixação e regulagem de altura da chama, durante o processo de soldagem. A Figura 21 apresenta o dispositivo de soldagem.

Figura 21 - Dispositivo de soldagem para a união metal-compósito.



Fonte: Produção do próprio autor

No dispositivo de soldagem a fixação e regulagem do maçarico se fez por intermédio de grampos sargentos tipo C, em uma haste metálica. Tijolos refratários foram utilizados para dar maior apoio e firmeza durante soldagem. A escolha deste processo é devido à versatilidade do equipamento, baixo custo e pela possibilidade de controle da temperatura à qual a amostra será submetida. A Tabela 11 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 11 - Parâmetros do processo de soldagem por oxi-combustível.

Distância da chama (mm)	Tempo de exposição (s)	Vazão do gás Propano (psi)
35	105	5

Fonte: Produção do próprio autor

A soldagem por oxi-combustível consiste no processo em que é utilizada uma tocha adaptada a um cilindro de gás, com um regulador de pressão no cilindro (5 psi), na qual uma chama resultante da queima do gás GLP é concentrada e aplicada à amostra de alumínio a ser soldada. Na Figura 22 é mostrado o processo de soldagem.

Figura 22 - Processo de soldagem por oxi-combustível.



Fonte: Produção do próprio autor

Ao expor a chama à liga de alumínio, ocorre a transferência de calor, alcançando-se temperaturas acima da transição vítrea da matriz do polímero termoplástico (cerca de 220°C), cuja medição é realizada por um pirômetro. Para cada corpo de prova soldado foi feita a medição de temperatura na superfície da liga, com um pirômetro (Figura 23). A medição era feita imediatamente após a soldagem, através do posicionamento do pirômetro na superfície da liga de alumínio que entrou em contato direto com a chama, para se averiguar se estava dentro da margem de temperatura estabelecida.

Figura 23 - Pirômetro utilizado para a medição da temperatura.



Fonte: Produção do próprio autor

Após a solidificação, obtém-se a junção dos materiais compósitos e a liga AA 2024. Para que a pressão aplicada na região de soldagem fosse mantida uniforme, foram utilizadas barras de aço em contato direto com as duas partes a serem soldadas, como é mostrada Figura 24.

Figura 24 - Dispositivo utilizado para fixação da liga AA 2024 e PEI/Fibra de vidro durante a soldagem.

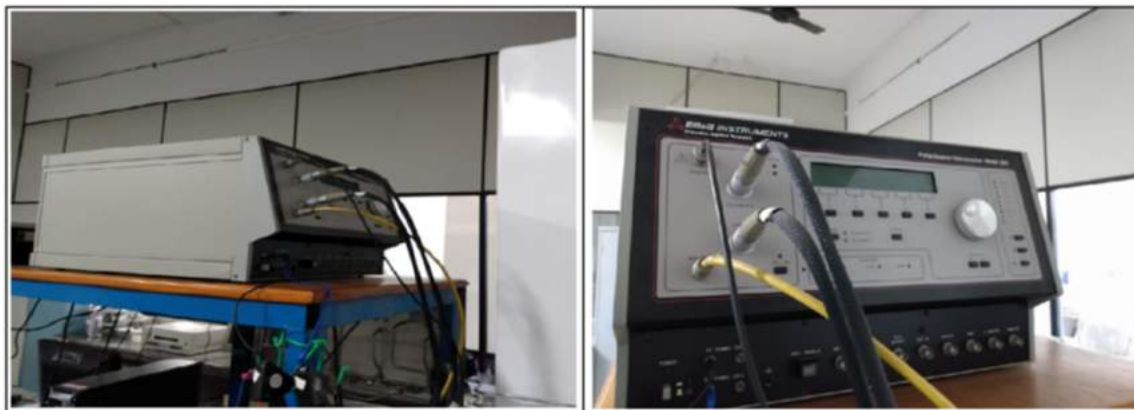


Fonte: Produção do próprio autor

3.2.4 Ensaios eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos consistiram em medições de potencial em circuito-aberto e obtenção de curva de polarização potenciodinâmica. Os ensaios foram realizados em um potenciostato/galvanostato da marca MICROQUÍMICA, modelo MQPG-01 e no potenciostato/galvanostato da marca EG&G-PARC, modelo 283, controlado por *software* PowerSuite (Power CORR e Power CV), mostrado na Figura 25. Para a realização do ensaio eletroquímico, a amostra da liga AA2024 sem tratamento (padrão) foi lixada com lixas d'água com granulometria de 200 e 600 mesh.

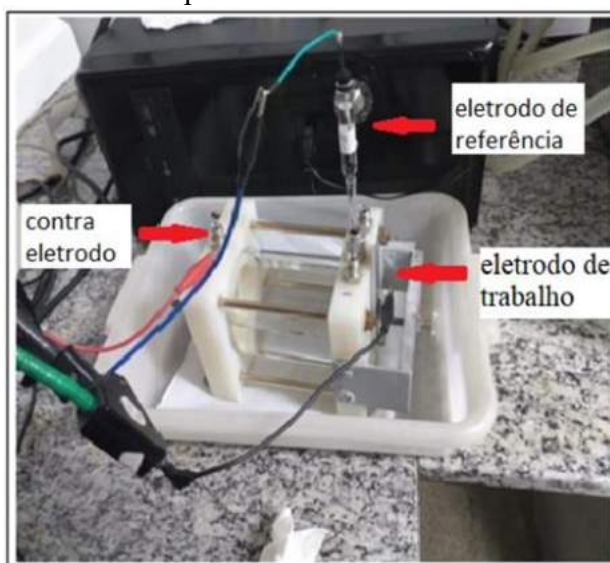
Figura 25 – Postenciostato/galvanostato EG&G utilizados nos ensaios eletroquímicos.



Fonte: Produção do próprio autor

A amostra foi adaptada na célula eletroquímica tipo *flat*, como mostra a Figura 26, contendo o eletrodo de trabalho, que consistiu na amostra da liga AA 2024, com área exposta de 1 cm^2 , o eletrodo de referência de Ag/AgCl (KCl, saturado) e um contra eletrodos de platina.

Figura 26 - Célula eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos.



Fonte: Produção do próprio autor

Os ensaios foram conduzidos em uma solução de NaCl 3,5 % (em massa), da marca *Synth* (P.A. 99 %), pH 6,2, aerada naturalmente, em temperatura ambiente de $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$. Inicialmente, realizou-se a medição de potencial em circuito aberto por um período de 4 horas ou 24 horas. Logo após, foram obtidas as curvas de polarização potenciodinâmica, para a verificação da estabilidade da camada passiva obtida após anodização.

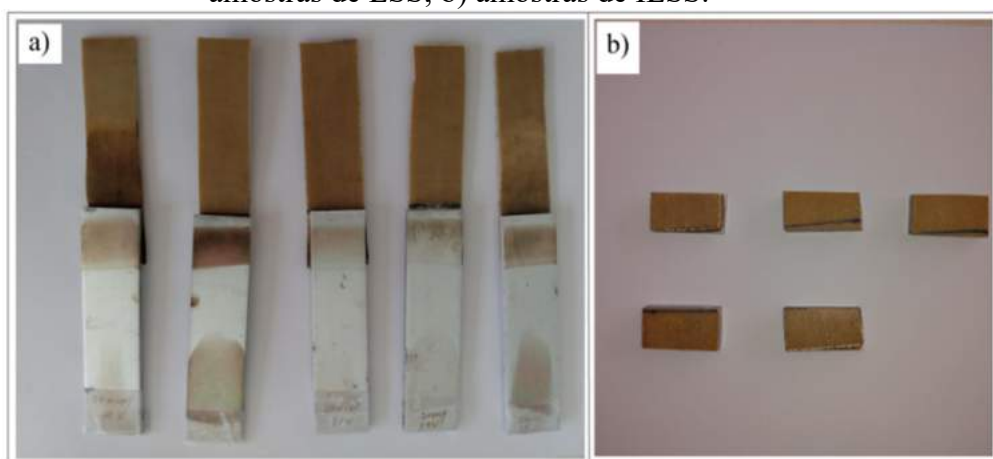
A curva de polarização foi realizada no intervalo de potenciais de -1,0 V até 0 V, com uma velocidade de varredura de 0,33 mV/s (20 mV/min). Foram realizados testes em triplicata para garantir a repetibilidade dos resultados.

3.2.5 Ensaio higrotérmico (imersão em água do mar sintética)

O ensaio consiste no ganho de umidade pelo material a ser trabalhado no período de um tempo estabelecido, até que a amostra atinja um estado de saturação, fazendo-se a medição do ganho de massa da amostra durante o teste (FARIA; CIOFFI; BOTELHO, 2012). Este teste é regido pela norma técnica ASTM D 5229/D 5229 (2014).

O material foi imerso em água do mar preparada de acordo com a norma ASTM D 1141-98 (2012), em duas temperaturas diferentes (30 °C e 60 °C), durante um período de 15 dias. Em cada uma das temperaturas foram utilizadas amostras soldadas e dimensionadas para os ensaios posteriores de LSS e ILSS. A Figura 27 são apresentadas as amostras antes da imersão.

Figura 27 - Amostras soldadas de AA 2024 e PEI/fibra de vidro antes da imersão: a) amostras de LSS; b) amostras de ILSS.

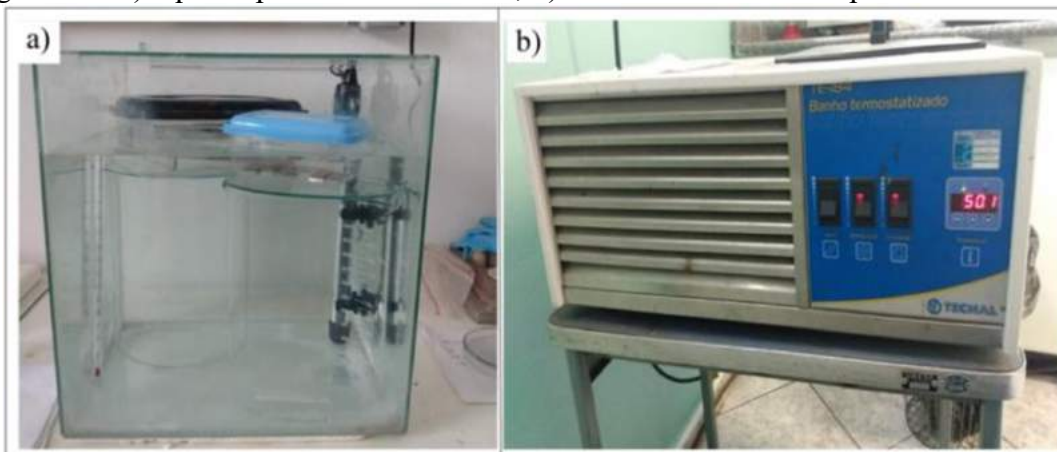


Fonte: Produção do próprio autor

Os materiais foram colocados em dois recipientes plásticos, imersos em água do mar, sintética, sendo um recipiente maior para as amostras de LSS e um recipiente menor para ILSS. Cada conjunto de amostras foi colocado em banhos para atingirem as temperaturas desejadas. As amostras que foram imersas na temperatura de 30 °C foram colocadas em um aquário com água deionizada e para o aquecimento foi utilizado um termostato próprio de

aquário, a temperatura era verificada com um termômetro imerso no banho (Figura 28a). Para a temperatura de 60°C, as amostras foram colocadas em um banho termostaticado da marca TECNAL, modelo TE- 184, Figura 28b, do departamento de materiais (DMT) da FEG/UNESP, campus de Guaratinguetá, contendo água deionizada.

Figura 28 - a) aquário para o banho a 30°C; b) banho termostaticado para o banho a 60°C



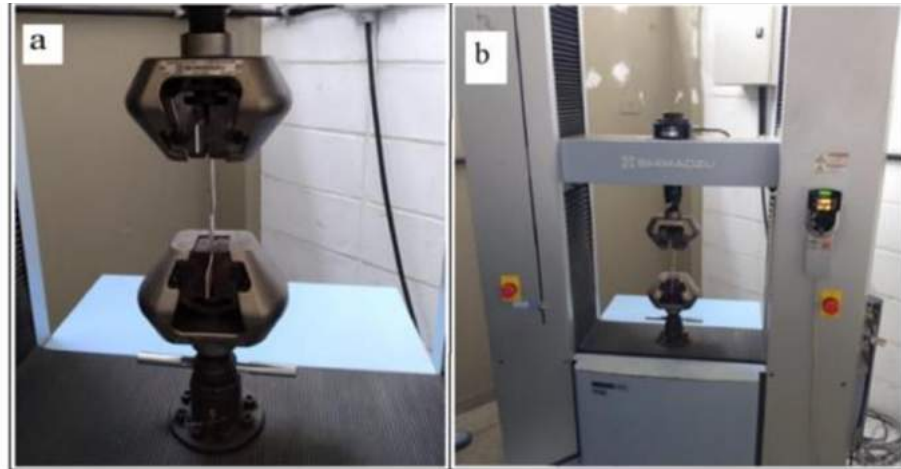
Fonte: Produção do próprio autor.

A manutenção dos banhos era feita diariamente, para a reposição da água do banho, reposição da água do mar e para a pesagem das amostras, durante o período de 15 dias. No banho mantido em 60 °C, essa reposição de água do banho teve que ser feita duas vezes ao dia, devido à temperatura mais elevada e a evaporação mais rápida. O volume de solução de água do mar sintética utilizado, inicialmente, para os ensaios de imersão foi cerca 1 L, sendo 700 mL para as amostras de LSS e 300 mL para as amostras de ILSS.

3.2.6 Teste *Lap Shear* (LSS)

O teste de *Lap Shear* foi realizado após o processo de soldagem por oxi-combustível, antes e depois dos testes de condicionamento e de corrosão, para a medição da resistência de ruptura da junta soldada da liga AA2024 e o material compósito. Os ensaios foram realizados com uma célula de carga de 50 kN (Figura 29a) a uma velocidade de 1,5 mm/min em uma máquina universal da SHIMATZU, modelo AG-X (Figura 29b), do departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da FEG/UNESP, campus de Guaratinguetá. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas ASTM D1002-10 (2019) e ASTM D5868-01 (2014).

Figura 29 – a) Amostra soldada da liga AA2024 com PEI/fibra de vidro, fixada na célula de carga; b) Equipamento utilizado para o ensaio de *Lap Shear*.



Fonte: Produção do próprio autor

Em cada condição adotada no planejamento experimental foi efetuada o ensaio de três amostras soldadas. Foram ensaiadas cerca de 12 amostras, sendo o cálculo de tensão de ruptura feito a partir da equação (1).

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

Sendo: τ – Tensão de ruptura (N/mm^2)

F_{max} – Força máxima de tração(N)

L – Comprimento da área soldada (mm)

b – Largura da área soldada (mm)

Este método foi utilizado para analisar a resistência da junta soldada em diferentes parâmetros de anodização. Sendo de suma importância para a determinação das variáveis resposta durante o planejamento experimental.

3.2.7 Ensaio de ILSS (interlaminar shear strength)

O ensaio de ILSS foi realizado com o objetivo de avaliar o cisalhamento interlaminar e comparar o cisalhamento na região soldada, na melhor condição de anodização, antes da

imersão e após a imersão em água do mar sintética, em diferentes temperaturas. O ensaio foi baseado na norma ASTM D2344 (2019), sendo realizado com uma célula de carga de 10 kN a uma velocidade de 1 mm/min em uma máquina universal da SHIMATZU, modelo AG-X, do departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da FEG/UNESP, campus de Guaratinguetá.

Figura 30 - Ferramenta utilizada para o ensaio de ILSS.



Fonte: Produção do próprio autor

A ferramenta utilizada neste ensaio consiste em um suporte com uma abertura regulável na qual a amostra é colocada (Figura 30), sendo a abertura deste suporte regulada em quatro vezes a espessura da amostra. O ensaio foi realizado nas amostras soldadas antes da imersão e nas amostras que ficaram imersas em diferentes temperaturas, sendo utilizadas cinco amostras na melhor condição de anodização, obtida no planejamento experimental. O dimensionamento das amostras foi feito com base na norma, onde: espessura (t); comprimento ($6*t$); largura ($2*t$). O cálculo da força de cisalhamento foi feito a partir da equação 2.

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

Onde: τ_c - tensão de cisalhamento (MPa)

F_{max} - força máxima

b - largura da amostra

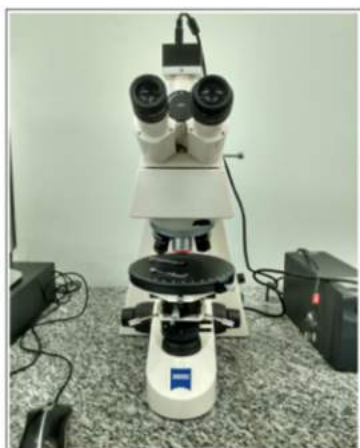
t - espessura da amostra.

3.2.8 Microscopia óptica

Para averiguar o ancoramento do compósito na superfície da liga AA 2024 anodizada, após o rompimento das amostras no ensaio de LSS, foram feitas análises da superfície rompida. Para a realização da análise foi utilizado um estereoscópio da marca ZEISS, modelo STEMI 2000, com ampliação de até 50x, sendo as imagens processadas pelo software *Image J*. A Figura 31 mostra o estereoscópio utilizado.

Para a microscopia óptica, as amostras foram preparadas mediante ao procedimento metalográfico de embutimento a frio, lixadas em lixas de granulometria de 220 a 3000 mesh e polidas em pasta de diamante 1 μm e analisadas no microscópio da marca OLYMPUS, com ampliação de 50x a 1000x. A Figura 32 apresenta o microscópio utilizado.

Figura 31 - Estereoscópio utilizado para análise.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 32 – Microscópio óptico utilizado para análise.



Fonte: Produção do próprio autor

3.2.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Uma análise mais detalhada da superfície da liga AA 2024, anodizadas nas diferentes condições de potencial e tempo e do produto de corrosão, foi realizada pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV por possuir uma resolução mais elevada que a microscopia óptica. O equipamento utilizado foi o microscópio da marca TESCAN, modelo VEGA 3 XMU, Figura 33. Estas análises foram realizadas no Departamento de Materiais e Processos da Divisão de Engenharia Mecânica – ITA.

As imagens foram capturadas em diferentes ampliações utilizando uma tensão de aceleração de 10 kV, um vácuo de $2,6 \times 10^{-2}$ Pa, um detector SE (elétrons secundários), e uma distância de trabalho que variou entre 13 e 27 mm.

Figura 33 - Microscopia Eletrônica de Varredura – (MEV) utilizado.

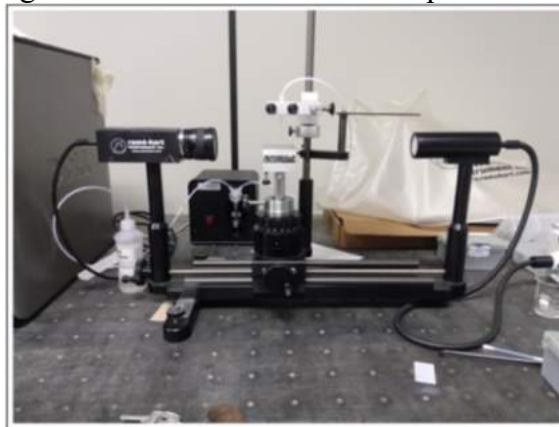


Fonte: Produção do próprio autor

3.2.10 Análise de molhabilidade

A estudo de molhabilidade da superfície das amostras da liga AA 2024 anodizadas foi realizado por medição do ângulo de contato, a fim de verificar se a superfície formada seria hidrofílica (ângulo maior que 90°) ou hidrofóbica (ângulo menor que 90°). A análise foi feita com o goniômetro ADVANCED, modelo 300-F1, como apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Goniômetro utilizado para análise.



Fonte: Produção do próprio autor

As análises foram feitas nas amostras anodizadas nas condições preliminares e na condição ideal, determinada através do planejamento experimental, sendo verificada cinco pontos de cada amostra, para uma maior confiabilidade dos resultados.

3.2.11 Análise de rugosidade

Foi feita a análise de rugosidade das amostras anodizadas nas condições preliminares e na melhor condição, a fim de verificar se qual era a característica da superfície em diferentes potenciais e tempo de anodização. Para essa análise foi utilizado o equipamento MITUTOYO, modelo *surf test* – 301 (Figura 35), do departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da FEG /UNESP, campus de Guaratinguetá.

Figura 35 - Rugosímetro utilizado para medição da rugosidade.



Fonte: Produção do próprio autor

Foram realizadas medidas de rugosidade média (R_a) de cada amostra anodizada em cinco pontos diferentes da superfície. Foi utilizado uma *cutoff* de 0,8 mm x 5, sendo um avanço total de 4 mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANODIZAÇÃO DA LIGA AA2024-T3

De modo a comprovar a eficácia do processo de anodização na soldagem de materiais híbridos, foram feitas anodizações em diferentes condições de potencial e tempo, para a obtenção dos parâmetros mínimos e máximos.

Para verificar qual a melhor condição de anodização para o planejamento experimental, foram definidas condições iniciais. Para se obter resultados confiáveis, amostras foram tratadas em triplicadas. De acordo com a Tabela 12, foram adotadas três condições de anodização, sendo elas: tensão de 10, 15 e 20 V e os intervalos de tempo 5, 12,5 e 25 min, respectivamente. Após a realização destes ensaios foi decidido incluir mais um valor de potencial (30 V), mantendo o intervalo de tempo de 25 min, para verificar a influência de potenciais mais elevados.

Tabela 12 - Parâmetros iniciais de potencial e tempo para o processo de anodização.

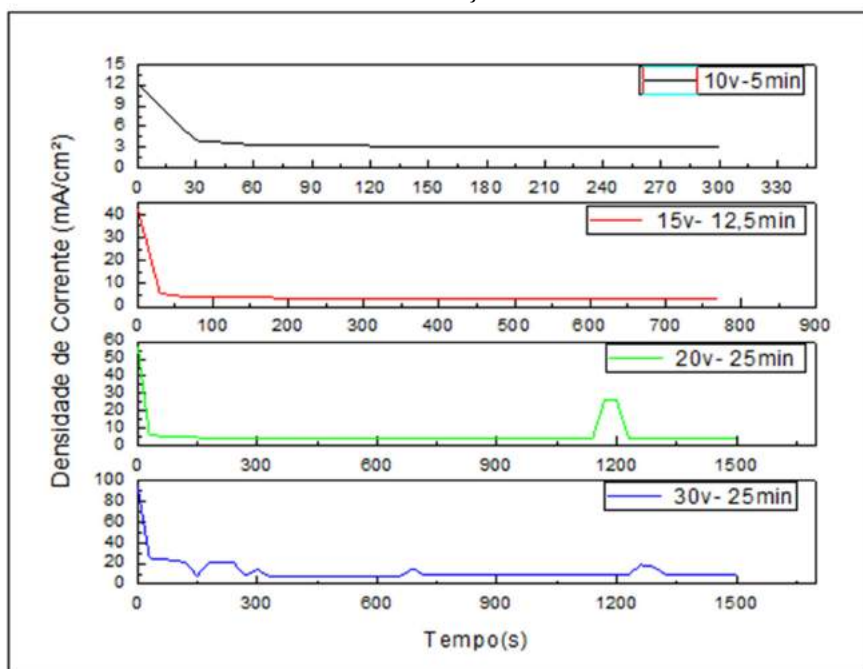
Condições de anodização		
Amostras	Tempo(min)	Potencial (V)
1	5	10
2	5	10
3	5	10
4	12,5	15
5	12,5	15
6	12,5	15
7	25	20
8	25	20
9	25	20
10	25	30
11	25	30
12	25	30

Fonte: Produção do próprio autor

Durante a anodização, foi feito o levantamento curva de corrente em função do tempo, de modo a verificar qual seria o tempo necessário para que a corrente atingisse estado estacionário. A medição da corrente foi feita diretamente no amperímetro da fonte de alimentação, a cada 30 s. A densidade de corrente foi calculada com base na área da amostra

em contato com o eletrólito. A Figura 36 apresenta as curvas de densidade de corrente em função do tempo, para cada condição de anodização.

Figura 36 – Curvas de densidade de corrente-tempo para as diferentes condições de anodização.



Fonte: Produção do próprio autor

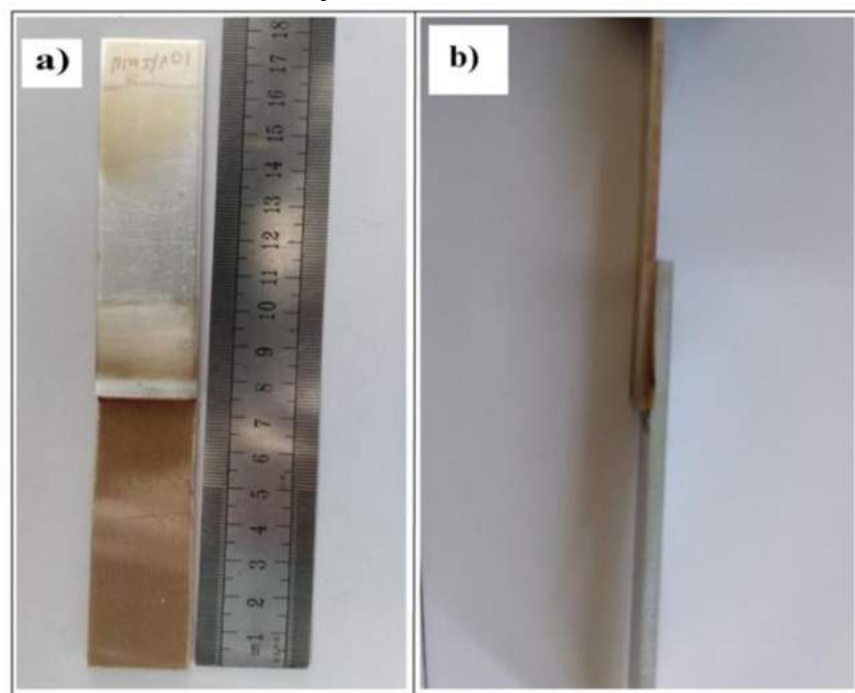
Como pode ser observado na Figura 36, todas as curvas apresentaram, no início, valores de densidade corrente (j) elevados, atribuído à ruptura da camada de óxido nativo devido ao potencial aplicado, seguido da queda de corrente, pela formação da camada compacta de óxido sobre o metal, até atingir a estabilidade, em cuja região se forma o óxido poroso. Nota-se que quanto maior o potencial de anodização, maior são os valores de corrente iniciais, sendo que a amostra de 10 V apresentou um valor de cerca de 12 mA/cm^2 e a amostra de 30 V, cerca de 90 mA/cm^2 . As curvas de j/t para as amostras com menor potencial de anodização mostraram maior estabilidade durante o período de anodização, enquanto as que foram anodizadas em potencial mais elevados apresentaram oscilações de corrente, no decorrer do processo.

4.2 PROCESSO DE SOLDAGEM OFW

Para assegurar um bom ancoramento entre as amostras de diferentes materiais (liga AA2024 e PEI/Fibra de vidro) é preciso que, no processo de soldagem, o compósito atinja uma temperatura acima de sua transição vítrea (T_g), para que possa haver seu amolecimento e por capilaridade a resina adentre os poros do óxido formado na superfície do alumínio anodizado. Como mostrado por Kumar et al. (2007) e Cacciotti et al. (2018), a temperatura de transição vítrea do compósito é cerca de 220 °C, por isso, a cada corpo de prova soldado, era feita a medição da temperatura na superfície da amostra da liga AA 2024 com o pirômetro, para verificar se a condição de soldagem era adequada.

Em todas as amostras da liga AA2024, foram feitos o lixamento da superfície na face onde o material recebia a chama, para que houvesse uma melhor distribuição de calor por todo o material. A inspeção da junta soldada era feita visualmente, para identificar possível degradação do compósito na junção entre os materiais dissimilares. A Figura 37a e 37b apresentam as imagens de topo e lateral, respectivamente, de uma amostra soldada da liga AA2024 e o compósito PEI/Fibra de vidro.

Figura 37 – a) Vista de topo da amostra PEI/fibra de vidro e AA 2024 soldada. b) vista lateral da junta soldada.



Fonte: Produção do próprio autor

O sucesso da soldagem era verificado após o resfriamento completo da amostras, que não deveriam se soltar durante o manuseio. A partir dos parâmetros de anodização iniciais (Tabela 12) foram obtidos e resultados de *Lap Shear*, como mostrado na Tabela 13.

De acordo com os resultados da Tabela 13, para as amostras tratadas em potenciais e tempos de anodização menores foram obtidos valores menores tensão de ruptura, indicando menor resistência das juntas soldadas. Na condição de anodização de 10 V e 5 min, foi obtido o menor valor de 9,44 MPa. O maior valor de *Lap Shear* na condição de 30 V/25 min foi da amostra 10 com 14,52 MPa, apresentando tensão de ruptura uma média de $(13,0 \pm 1,3)$ MPa, para as amostras 10, 11 e 12, sendo verificado que não resultou em um aumento expressivo na resistência da junta soldada no potencial de anodização para 30 V. Este valor é bem próximo do observado para as amostras 4,5 e 6, cujo valor médio de tensão de ruptura foi de $(12,4 \pm 0,3)$ MPa, na condição de anodização de 15 V e 12,5 min.

Tabela 13 – Condições de anodização, temperatura de soldagem e valores de *Lap Shear* das amostras soldadas.

Condições de anodização			Soldagem das amostras		
Amostras	Tempo (min)	Tensão (V)	Temperatura de soldagem (°C)	<i>Lap Shear</i> (MPa)	Média (MPa)
1	5	10	437	9,44	$(11,3 \pm 1,3)$
2	5	10	374	11,85	
3	5	10	476	12,49	
4	12,5	15	433	12	$(12,4 \pm 0,3)$
5	12,5	15	444	12,22	
6	12,5	15	414	12,7	
7	25	20	426	10,49	$(12,2 \pm 1,2)$
8	25	20	411	13,08	
9	25	20	391	13,14	
10	25	30	398	14,52	$(13,0 \pm 1,3)$
11	25	30	407	11,93	
12	25	30	431	12,67	

Fonte: Produção do próprio autor

4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para determinar de modo eficiente as melhores condições de anodização, foi adotada a realização de um planejamento experimental, tendo os parâmetros de potencial (V) e tempo (min), sendo utilizados como variáveis de entrada. Cada experimento foi efetuado com o objetivo de determinar um maior resultado de LSS (*Lap Shear*), sendo que para cada

parâmetro foram soldadas três amostras totalizando 12 amostras, para obtenção dos dados estatísticos.

Como estudado por Albiero et al. (2012) o planejamento experimental fatorial 2^k , é de suma importância para o processo de otimização, para sistemas que possuem muitas variáveis é muito útil em seus estágios iniciais. Sendo o planejamento experimental em questão denominado *Central Composite Design* (CCD) com dois níveis e dois fatores $k = 2$, sendo formado de dois grupos de dados distintos (2^2).

Para a otimização do processo de anodização, neste trabalho, aplicou-se o planejamento fatorial completo 2^k , com dois níveis (mínimo e máximo) e dois fatores (potencial e tempo), com 5 replicatas no ponto central, totalizando 13 testes. A Tabela 14 apresenta matriz experimental com os resultados de *Lap Shear* obtidos de acordo com o planejamento estatístico para a anodização das ligas AA 2024.

Tabela 14 - Matriz experimental e resultados de Lap Shear.

Experimento	Tempo (min)	Potencial (V)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	5,00	10,00	11
2	20,00	10,00	14
3	5,00	20,00	10
4	20,00	20,00	11
5	1,89	15,00	11
6	23,11	15,00	11
7	12,50	7,93	13
8	12,50	22,07	10
9	12,50	15,00	12
10	12,50	15,00	12
11	12,50	15,00	12
12	12,50	15,00	12
13	12,50	15,00	12

Fonte: Produção do próprio autor

Os valores de tensão de ruptura encontrados dos ensaios de *Lap Shear* variaram entre 10 e 14 MPa, para as amostras soldadas entre a liga AA2024 e PEI/Fibra de vidro, sendo o experimento 3 o de menor valor (10 MPa) e o experimento 2 de maior valor (14 MPa). Este último experimento foi realizado com a amostra anodizada aplicando-se um potencial de 20 V

e tempo 20 minutos. Os dados dos experimentos mostraram que com a variação de tempo e potencial de anodização pode-se obter juntas com maior tensão de ruptura (*Lap Shear*).

Com base nos resultados obtidos no ensaio de *Lap Shear* e com a utilização de um programa estatístico *Design-Expert 6.0*, e por meio da análise de variância (ANOVA) foi comprovar as variáveis significativas deste processo. Os dados são apresentados na Tabela 15.

Valores de "Prob< F" menores que 0,0500 indicam que os termos do modelo são significativos. Neste caso, A e B são termos de modelo significativos, no estudo da anodização convencional, as variáveis que demonstraram significância foram o tempo e potencial. A partir desta análise verificou-se que a tensão de ruptura (variável resposta) é influenciada direta, tanto da variável tempo, quanto da variável potencial (variáveis independentes).

Nesse modelo as variáveis quadráticas de potencial e tempo não mostraram significância para a variável resposta no final do processo. O valor de $R^2 = 0,858568005$, indica que 85,85% da variabilidade do processo pode ser averiguada pelo modelo.

Tabela 15 - Análise de variância (ANOVA) para do processo de anodização da liga AA2024.

Fonte	Soma dos quadrados	DF	Quadrado Médio	Valor de F	Prob>F
Modelo	12,94456376	5	2,588912753	8,498750262	0,0069
A	2	1	2	6,565497623	0,0374
B	8,492640687	1	8,492640687	27,87920612	0,0011
A ²	1,331521739	1	1,331521739	4,371051407	0,0749
B ²	0,244565217	1	0,244565217	0,802846177	0,4000
AB	1	1	1	3,282748811	0,1129
Residual	2,132359313	7	0,304622759		
Falta de ajuste	2,132359313	3	0,710786438		
Erro puro	0	4	0		
Cor. total	15,07692308	12			
R ²	0,858568005				

*Valores significantes < 0,05; A = Tempo; B = Tensão

Fonte: Produção do próprio autor

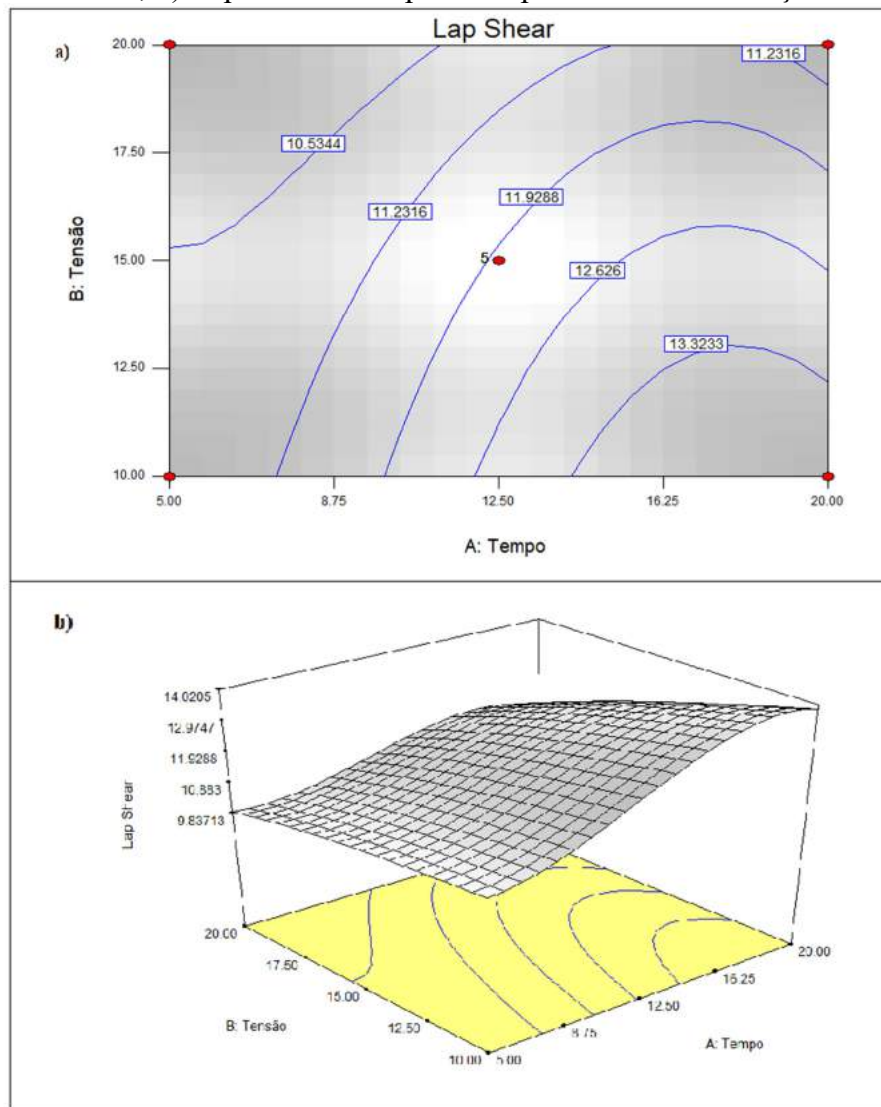
Pelo modelo da análise de variância (ANOVA) foi elaborado um modelo estatístico incluindo os coeficientes dos parâmetros significativos para o processo de anodização apresentado na Equação 3.

$$Lap\ Shear = +12,00 + 2,00 * A - 0,94 * B - 0,44 * A^2 - 0,19 * B^2 - 0,50 * A * B - 1,00 * A^3 - 0,061 * B^3 \dots\dots\dots (3)$$

Onde: A = Tempo e B = Tensão

Para se estimar os coeficientes definidos pela equação geralmente se utiliza o método *Ordinary Least Squares* (OLS), buscando construir uma função aproximada relacionada às respostas de interesse com as variáveis do processo. Desta forma, busca-se definir o melhor ajuste para um conjunto de dados visando minimizar a diferença entre os valores estimados e os valores observados. Utilizando o programa *Design-Expert*, obteve-se o valor máximo de resistência no ensaio LSS, dentro dos parâmetros estudados, gerando os gráficos de superfície resposta. A Figura 38 mostra as curvas de nível e a superfície de resposta com as condições de anodização e os respectivos valores de tensão de cisalhamento do LSS (*Lap Shear*) apresentados na tabela 14.

Figura 38 a) Curvas de nível na soldagem entre a liga AA2024 e o compósito PEI/Fibra de vidro; b) Superfície de resposta do processo de anodização.



Fonte: Produção do próprio autor

Dada a análise estatística da superfície de resposta com o resultado da anodização, sugere-se que a variável resposta de maior valor predita pelo programa foi de 14 MPa, indicando que os valores das variáveis independentes, potencial e tempo, dentro das faixas estimadas seriam de 10 V e 18 minutos. Sendo a curva da superfície de resposta mostrando as melhores condições de anodização indicado pelo programa, a partir da elevação do gráfico.

4.4 POTENCIAL EM CIRCUITO ABERTO (E_{CA})

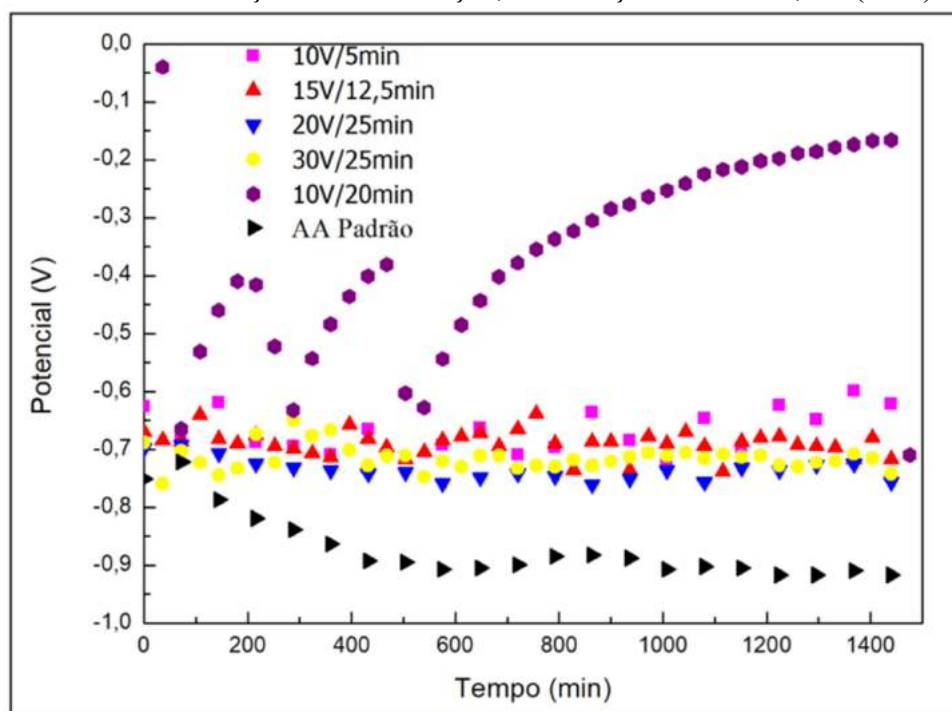
Neste trabalho são apresentadas as medições de potencial em circuito aberto registrados por 24 horas. Na Figura 39 são apresentadas as curvas de E_{CA} /tempo para as amostras de liga AA 2024 não anodizada (padrão) e nas diferentes condições de potencial e tempo de anodização. Na análise da curva E_{CA} /tempo para a liga AA 2024 padrão pode ser observado valores mais negativos de potencial, tanto no instante da imersão, como após 24 h. O valor no instante da imersão é de -0,746 V, ocorrendo um deslocamento do potencial para -0,916 V, após 24 h. Este comportamento indica uma ativação da superfície, resultante da dissolução do óxido nativo, devido a agressividade da solução de NaCl 3,5%.

De um modo geral, em todas as curvas de E_{CA}/t para as amostras anodizadas, os valores de potencial no instante da imersão são mais positivos que os observados para a amostra padrão. Após 24 h, esse valor é ligeiramente mais negativo que o inicial. O valor mais positivo para o E_{CA} , em relação à amostra padrão, pode ser atribuído à maior estabilidade da camada de óxido formado no processo de anodização. Outra característica das curvas E_{CA}/t , para as amostras anodizadas é a oscilação de potencial observada, que indica a ruptura e repassivação da camada de óxido na superfície devido à presença dos íons cloreto no meio.

Na Tabela 16 são apresentados os valores de potencial no instante da imersão e após 24 h de acompanhamento do potencial, para a liga não-anodizada e nas diferentes condições de anodização. Nota-se que os valores de E_{CA} iniciais para as amostras anodizadas são próximos, variando de -0,648 V a -0,705 V, indicando que a natureza do óxido formado é a mesma em todas as amostras.

Após 24h, o deslocamento do potencial é pequeno (menor 0,050 V), indicando que mesmo com deterioração da camada de óxido, pela presença de íons cloreto, o óxido ainda está presente na superfície da liga, após esse intervalo de tempo. Dentre as amostras anodizadas, a que apresentou potencial mais positivo foi a amostra anodizada em 10V/5min, mostrando um potencial de cerca de -0,623 V, ao final de 24 h. No entanto, esta amostra é a que apresenta a maior oscilação de potencial, portanto, mais susceptível ao ataque de íons cloreto. A amostra na melhor condição de anodização, obtida do planejamento experimental, apresentou um valor de potencial de + 0,046 V, no instante da imersão e, após 24 h, um valor de -0,166 V, sempre acompanhado de uma grande oscilação do potencial. Este valor bastante positivo, observado nesta condição de anodização, indica a presença de uma camada protetora, provavelmente de óxido, formada sobre a superfície da liga.

Figura 39 – Curvas de potencial de circuito aberto para a liga AA2024 sem tratamento e nas diferentes condições de anodização, em solução de NaCl 3,5% (m/m).



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 16 – Potenciais em circuito aberto para a liga AA 2024 sem tratamento (padrão) e nas diferentes condições de anodização, em solução de NaCl 3,5 % (m/m).

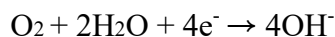
AA2024 T3	Potencial inicial (E_i)	Potencial Final (E_f)
Padrão	-0,748	-0,916
10V-5min	-0,648	-0,623
15V-12,5min	-0,666	-0,696
20V-25 min	-0,705	-0,748
30V-25min	-0,689	-0,735
*10V-20min	0,045	-0,166

Fonte: Produção do próprio autor

4.5 CURVA DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

As curvas de polarização apresentadas neste trabalho foram obtidas para as amostras da liga AA 2024 sem tratamento e nas diferentes condições de anodização após a imersão por 24 horas em solução de NaCl 3,5% (m/m). Estes ensaios foram realizados nestas condições, pois nas amostras anodizadas, uma oscilação de potencial era observada nas primeiras horas, indicando a deterioração da camada de óxido e como consequência influenciando na resistência à corrosão da liga anodizada.

Na Figura 40 são apresentadas as curvas de polarização da liga AA2024 sem tratamento de anodização (padrão) e nas diferentes condições de anodização, em solução de NaCl 3,5 % (m/m). Em todas as curvas, observa-se, na região catódica, um comportamento de controle difusional, indicado pela presença de corrente limite, onde o processo é controlado, principalmente, pela reação de redução de oxigênio presente no eletrólito:



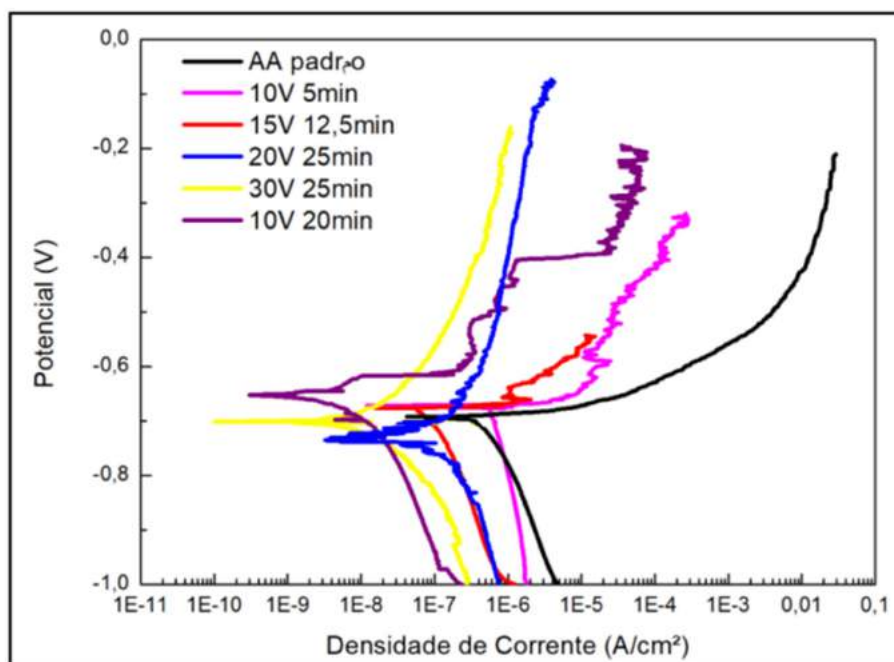
Estudos realizados por Camargo et al. (2009) e Girginov et al. (2017) avaliaram o comportamento deste material imerso em NaCl 3,5 % e atribuíram essa diferença nos parâmetros de corrosão à alteração na espessura da camada formada durante o processo de anodização. Nessa comparação ficou evidenciado o papel do potencial aplicado nas amostras durante a anodização.

Na região anódica, a amostra da liga AA2024 sem tratamento não mostra comportamento passivo, indicando uma superfície livre de óxidos, resultando na dissolução do metal, quando a varredura é realizada no sentido de potenciais positivos. Já, para as amostras de liga nas diferentes condições de anodização observa-se comportamento passivo, porém nota-se uma oscilação de corrente durante a varredura de potenciais, que pode ser atribuída à ruptura e repassivação da camada de óxido presente na superfície do metal. Na Tabela 17 são apresentados os parâmetros de corrosão, obtidos a partir das curvas de polarização apresentadas na Figura 40.

Após 24 horas de imersão, já não se observa diferença significativa nos potenciais de corrosão, quando comparado com a amostra sem tratamento. Para todas as amostras estudadas, o E_{corr} não varia mais que 0,075 V. Quanto aos valores de densidade de corrente de corrosão, são todos da ordem de 10^{-7} A/cm^2 , com exceção da liga anodizada em 30V/25 min ($7,8 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$). A partir da Tabela 17, observa-se que há uma diminuição dos valores de j_{corr} , quando o potencial e o tempo de anodização é aumentado, indicando que estes dois parâmetros têm grande influência na resistência à corrosão do material estudado.

A amostra na melhor condição de anodização (10 V/20min) apresentou um potencial de corrosão (E_{corr}) de -0,654 V, o mais positivo dentre todas as condições estudadas e um valor de densidade de corrente de corrosão (j_{corr}) de $2,9 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Este valor de densidade de corrente é inferior aos obtidos nas demais condições de anodização, revelando uma maior resistência à corrosão para a amostra tratada nesta condição.

Figura 40 - Curvas de polarização da liga AA2024 não-anodizada e nas diferentes condições de anodização, obtidas após 24 h de imersão, em solução de NaCl 3,5% (m/m).



Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 17 - Potencial de corrosão (E_{corr}) e densidade de corrente de corrosão (j_{corr}) obtidos das curvas de polarização das amostras após imersão por 24 horas (Fig. 40).

AA2024-T3	E_{corr} (V)	j_{corr} (A/cm ²)
Padrão	-0,694	$6,1 \times 10^{-7}$
10V/5min	-0,673	$7,2 \times 10^{-7}$
15V/12,5min	-0,693	$1,0 \times 10^{-7}$
20V/25min	-0,729	$2,3 \times 10^{-7}$
30V/25min	-0,704	$7,6 \times 10^{-8}$
*10V/20min	-0,654	$2,9 \times 10^{-8}$

*Melhor condição de anodização

Fonte: Produção do próprio autor

4.6 ESPESSURA DA CAMADA FORMADA NA ANODIZAÇÃO

Para a verificação da influência dos parâmetros potencial e tempo na camada anodizada, foi feita a medição de espessura do óxido, através do uso de microscopia óptica, seguindo a norma ABNT NBR 12611 (2006), em que a medição é feita na seção transversal da amostra. Cada amostra da liga AA 2024 anodizada nas diferentes condições, foi seccionada, embutida em resina acrílica a frio e atacada com ácido fluorídrico 2% da marca Cromoline (P.A. 40%). Para cada amostra foram selecionados cinco pontos em diferentes regiões. A Tabela 18 apresenta os valores de espessura da camada de óxido formado, em cada condição de anodização.

Tabela 18 - Valores de espessura da camada formada nas amostras de AA2024, nas diferentes condições de anodização.

Espessura da camada (μm)					
Amostra	10v/5min	15v/12,5min	20v/25min	30v/25min	*10v/20min
Ponto 1	72,32	85,51	88,97	69,81	89,14
Ponto 2	70,70	90,12	86,74	65,17	88,97
Ponto 3	76,75	87,05	87,46	67,29	87,14
Ponto 4	70,64	89,22	85,54	64,47	86,89
Ponto 5	71,98	90,23	84,64	68,12	88,30
Média	72,47	88,42	86,67	66,97	88,08
Desvio padrão	2,23	1,85	1,50	1,94	0,92

*Melhor condição de anodização

Fonte: Produção do próprio autor

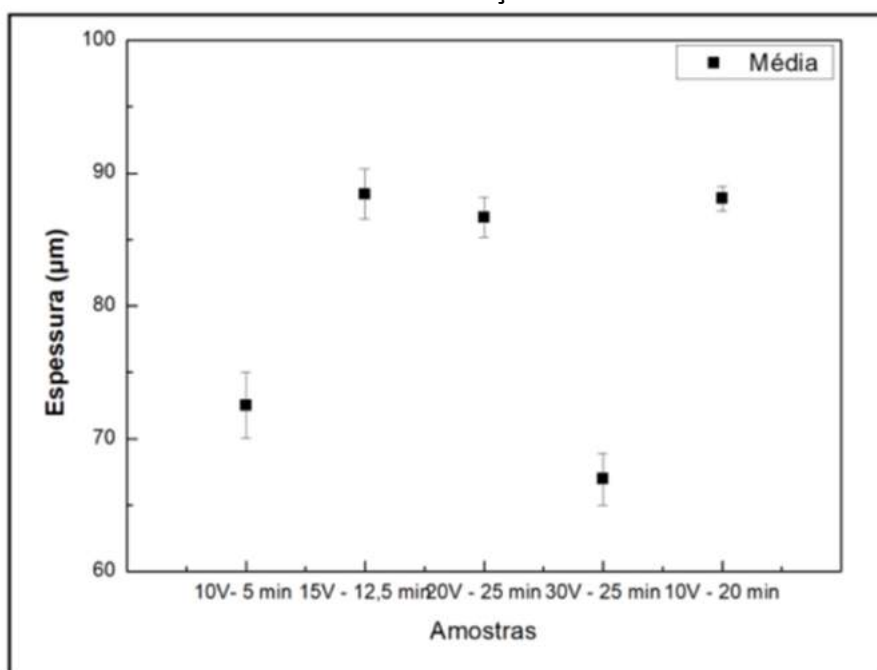
A partir da Tabela 18, é possível observar a diferença de espessura entre as diferentes condições de anodização. Nota-se uma tendência de aumento de espessura nas três primeiras análises: 72,5 μm (10V/5min), 88,4 μm (15V/12,5min), e 86,7 μm (20V/25min), indicando que no processo de anodização, ao aumentar o potencial há o crescimento da camada de óxido. Na condição de 30 V/25 min há uma diminuição expressiva na espessura da camada. Esta condição é que apresenta o menor valor de espessura (67,0 μm).

O comportamento observado para potencial e tempo elevados indica que não há mais o crescimento da camada de óxido, mas ocorre a dissolução da camada porosa de óxido na

própria solução durante o processo de anodização, indicando que no potencial de 20 V/25 min, a camada porosa já atingiu seu limite de crescimento. Na Figura 41 é apresentado o gráfico com os valores de espessura média da camada de óxido formado na anodização.

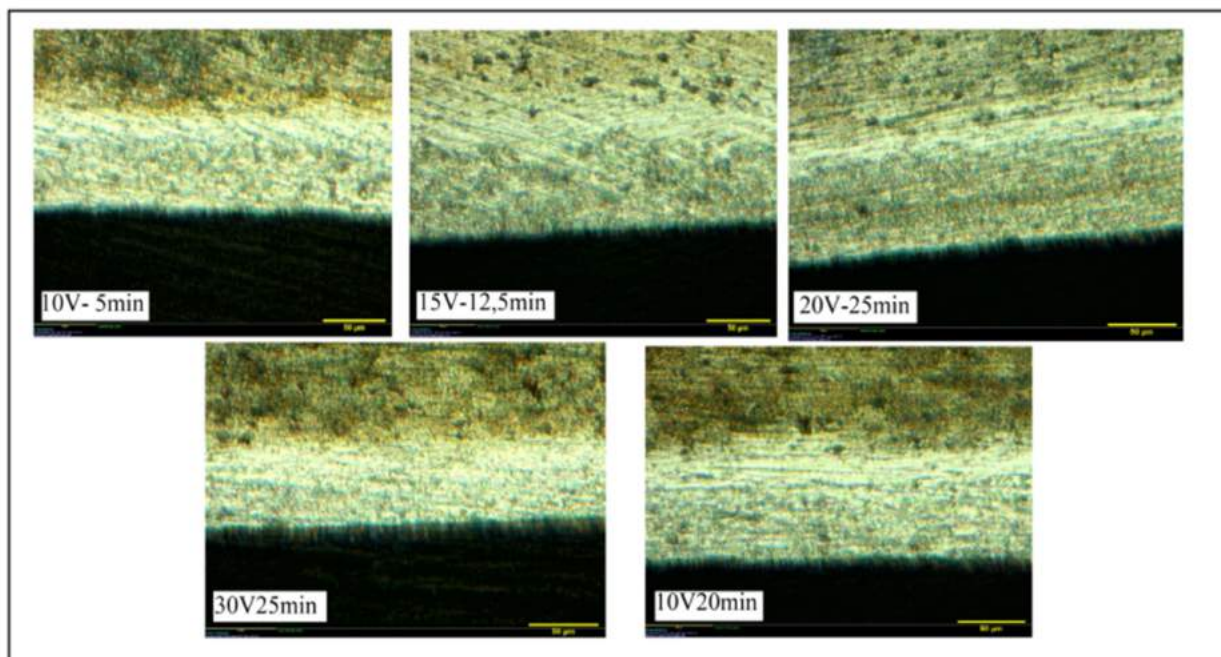
A partir da Figura 42, outra análise a ser feita é a da espessura da camada na melhor condição de anodização (10V/20 min). O valor obtido nesta condição foi da ordem de 88,1 μm . Ao analisar o gráfico, se pode verificar que dentre os valores de espessura de camada apresentados, na condição de 20V/25 min, observou-se um comportamento mais homogêneo em comparação com as demais condições, como é verificado pelo valor de desvio padrão de 0,92 μm , podendo indicar um crescimento mais uniforme da camada de óxido ao longo de toda a superfície da amostra. A Figura 42 apresenta as imagens obtidas por microscopia óptica de cada condição de anodização.

Figura 41 - Espessura média da camada de óxido formada nas diferentes condições de anodização.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 42 – Imagens MO das camadas de óxido para cada condição de anodização; aproximação de 200x.



Fonte: Produção do próprio autor

4.7 ENSAIO DE MOLHABILIDADE

O ensaio de molhabilidade foi usado para mostrar a hidrofilicidade da superfície da liga AA 2024 em cada condição de anodização. Foi realizada a comparação entre as condições preliminares (10 V/5 min, 15 V/12,5 min, 20 V/25 min e 30 V/25 min) e a melhor condição (10 V/20min). Nessa análise é projetada uma gota de água na superfície da liga para verificar seu formato e o ângulo formado com a superfície (ângulo de contato). Se o ângulo analisado for maior que 90°, o material é considerado hidrofóbico e se for menor que 90° o material é considerado hidrofílico, o que significa uma facilidade de penetração da água em sua superfície. A Tabela 19 apresenta os valores de ângulo de contato de cada amostra da liga AA 2024 anodizada nas diferentes condições de potencial e tempo.

Tabela 19 - Valores de ângulo de contato nas diferentes condições de anodização.

Amostras	Ângulo de contato (°)	Desvio padrão
10 V/5min	19,14	1,44
15 V/12,5min	19,21	3,65
20 V/25min	9,29	0,82
30 V/25min	10,34	1,37
10 V/20min*	8,21	0,90

*Melhor condição de anodização

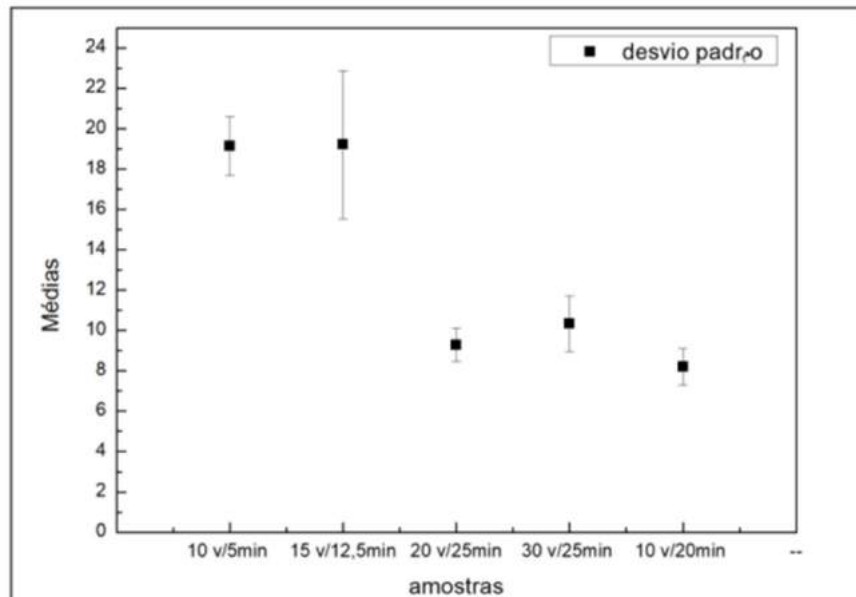
Fonte: Produção do próprio autor

Os valores apresentados das amostras anodizadas mostraram que todas revelaram comportamento hidrofílico, sendo este um fator importante para uma maior adesão no processo de soldagem entre compósito e a liga de alumínio. Na condição ideal de anodização (10 V/20 min) observou-se o menor ângulo de contato (8,12°), mostrando um comportamento mais hidrofílico. Como observado por Jothi (2020), a propriedade de molhabilidade foi mais bem alcançada com a anodização a partir de 10 V, sendo observado o valor de ângulo de contato de 13 ° na condição de anodização de 15 V por 30 minutos.

Este comportamento também foi investigado por Figueroa et al. (2018) e Yoganandan et al. (2014) onde os autores destacam que a superfície do alumínio quando anodizada formam uma superfície altamente rugosa e porosa, apresentando vales e picos desiguais em sua superfície, responsável elevada hidrofilicidade, apresentando um ângulo de contato médio de 15°.

A Figura 43 apresenta os valores médios de ângulo de contato das amostras de AA 2024 estudadas neste trabalho. A partir da Figura 43, pode-se notar uma diferença significativa entre os valores de ângulo de contato para as amostras anodizadas em potenciais mais elevados e a amostra na melhor condição, quando comparada com as de menor potencial. Estudos sugerem que este comportamento é devido a uma maior rugosidade da superfície da amostra anodizada, que apresenta uma alta energia de superfície e hidrofilicidade.

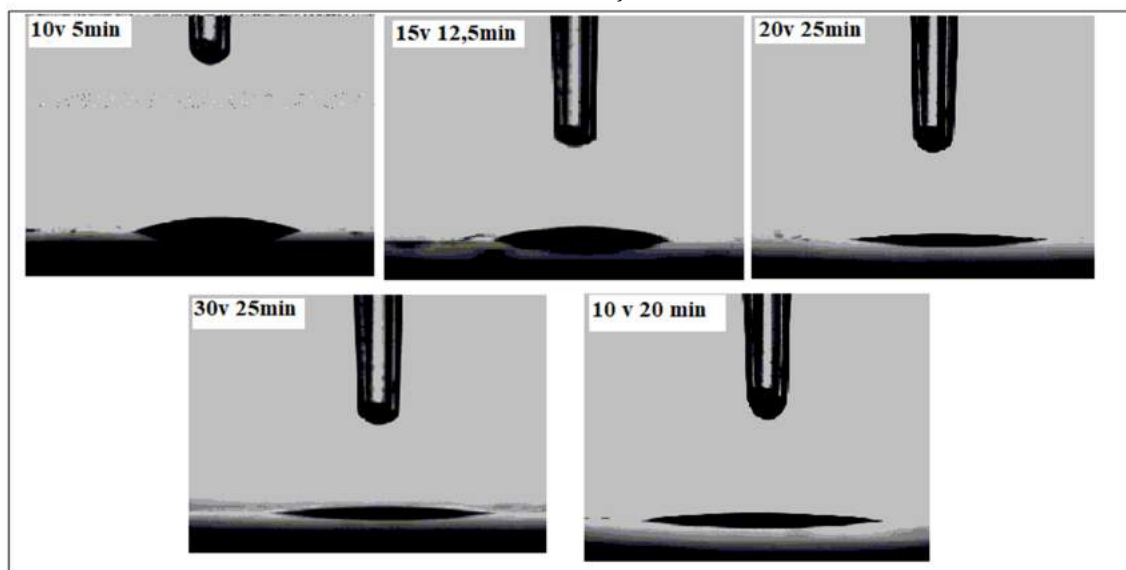
Figura 43- Valores médios de ângulo de contato da liga AA 2024 nas diferentes condições de anodização.



Fonte: Produção do próprio autor

A energia livre de uma superfície fornece informações sobre as interações intermoleculares, exercendo um forte impacto no comportamento de adsorção e adesão com outros materiais (KUMAR et al., 2018). A Figura 44 ilustra a interação da superfície da liga anodizada nas diferentes condições com a gota de água.

Figura 44 - Imagens da gota de água na superfície da liga AA 2024 nas diferentes condições de anodização.



Fonte: Produção do próprio autor

Esse aspecto da gota da água corrobora com as análises feitas anteriormente, justificando a resistência da junta soldada, visto que o princípio da soldagem entre compósito e a liga de alumínio anodizada é a penetração do PEI através dos poros por meio de capilaridade. Portanto, quanto maior a hidrofiliabilidade da superfície da liga, maior será a penetração do PEI nessas regiões.

4.8 ENSAIO DE RUGOSIDADE

No ensaio de rugosidade, as medições foram realizadas para as amostras da liga AA 2024 nas condições preliminares de anodização e na melhor condição, segundo o planejamento experimental. Neste ensaio as amostras são riscadas e verificadas a rugosidade em sua superfície. A rugosidade aritmética (R_a) foi obtida em cinco pontos diferentes em cada amostra. A Tabela 20 apresenta os resultados rugosidade aritmética para a liga AA 2024 nas diferentes condições de anodização.

Tabela 20 - Valores da rugosidade aritmética nas diferentes condições de anodização.

Rugosidade média (R_a) (μm)					
Amostra	10V/5mi n	15V/12,5mi n	20V/25m in	30V/25mi n	*10V/20m in
1	0,67	0,82	0,61	0,94	0,87
2	0,91	1,30	0,34	0,78	0,54
3	0,71	1,41	0,48	1,39	0,88
4	0,68	0,61	0,58	1,08	0,55
5	1,07	0,68	0,65	1,28	0,63
Média	0,80	0,96	0,53	1,09	0,69
Desvio padrão	0,14	0,32	0,11	0,22	0,15

*Melhor condição de anodização

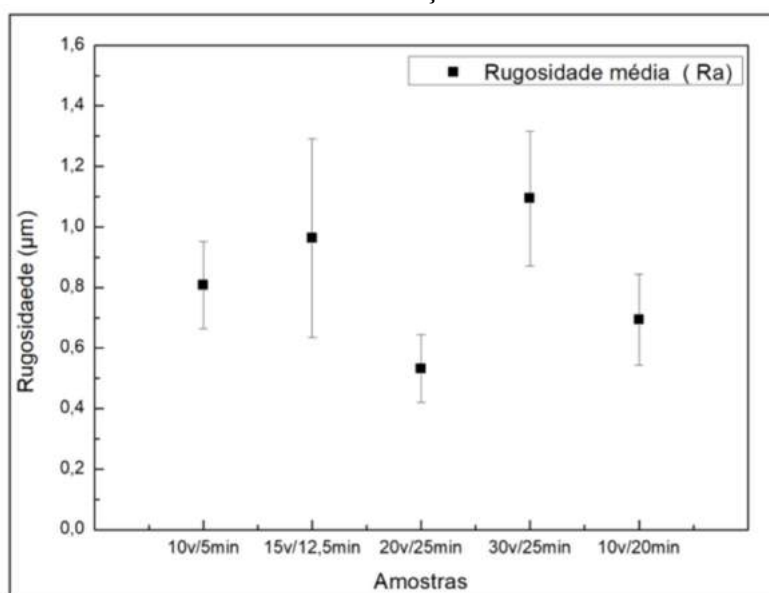
Fonte: Produção do próprio autor

A partir da Tabela 20 observa-se diferentes valores de rugosidade para uma mesma amostra, evidenciando que a superfície pode não ser totalmente homogênea, em decorrência da presença de vales e picos desiguais ao longo da amostra. Essas formações são importantes

no ancoramento do compósito e com liga de alumínio, seguindo o princípio do intertravamento mecânico. Esse aspecto foi acompanhado por Yoganandan et al. (2014) ao anodizar as amostras de liga de alumínio em ácido fosfórico (PAA), onde foi verificada a formação de camadas não homogêneas por este método de anodização. Após o período de 30 dias de envelhecimento os valores de rugosidade apresentaram queda.

Todas as amostras analisadas no presente trabalho apresentaram valores de rugosidade acima de 0,50 μm , sendo a condição de 30 V/25min a que apresentou maior valor médio de rugosidade (1,09 μm), enquanto na melhor condição de anodização (20V/10min) obteve-se um valor de 0,69 μm . Estes valores permitem se ter uma ideia da morfologia do óxido formado na superfície, após o processo de anodização pois, de modo geral, a rugosidade desempenha um papel fundamental no processo de adesão entre o compósito e a liga de alumínio. A Figura 45 apresenta os valores de rugosidade média (Ra) das amostras de AA 2024 anodizadas nas diferentes condições de potencial e tempo.

Figura 45 - Valores de rugosidade (Ra) da liga AA 2024 nas diferentes condições de anodização.



Fonte: Produção do próprio autor

Como é visto na Figura 45, a rugosidade tende a aumentar de acordo com o aumento de potencial utilizado durante a anodização, com exceção das amostras de 20 V/25 min e 10 V/20min. Esse comportamento também foi observado nos estudos de Jothi (2020) que, apesar da melhor condição encontrada ser a de 15 V, obteve um valor de rugosidade (Ra) de 0,81 μm , enquanto que para a condição de anodização em 20 V foi a que apresentou maior

rugosidade ($R_a = 1,17 \mu\text{m}$). Esse comportamento sugere que a rugosidade aumenta de acordo com o maior potencial aplicado durante a anodização

4.9 MICROSCOPIAS ÓPTICAS DAS AMOSTRAS ROMPIDAS APÓS O ENSAIO DE LSS

Ao se analisar as superfícies da liga AA 2024 após os ensaios de LSS, por meio de um estereoscópio, foram notadas as diferenças entre as amostras nas condições distintas de anodização. Na Figura 46 é mostrada a região rompida, circulado em vermelho, na superfície da liga de alumínio, que foi analisada para verificar se a matriz polimérica ficou impregnada na superfície do metal.

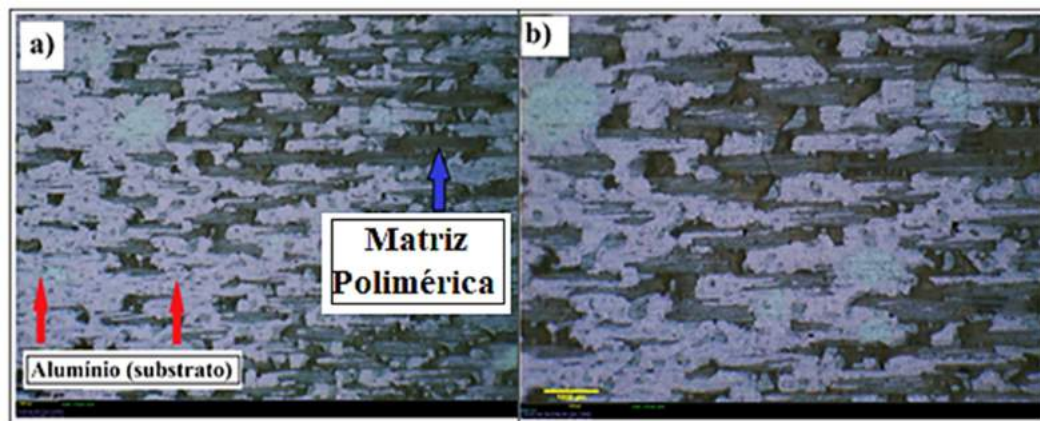
Figura 46 - Amostra de PEI fibra de Vidro e da liga AA 2024 rompida.



Fonte: Produção do próprio autor

Foram analisadas as amostras a fim de verificar o ancoramento entre o compósito e a liga de alumínio. Ao se analisar a liga anodizada em 10 V/5 minutos, Figura 47, a região rompida apresentou uma pequena quantidade de compósito impregnado.

Figura 47 - Região rompida da amostra da liga AA 2024 anodizada em 10V/5 min: a) aproximação de 6,5x ; b) aproximação de 10x.



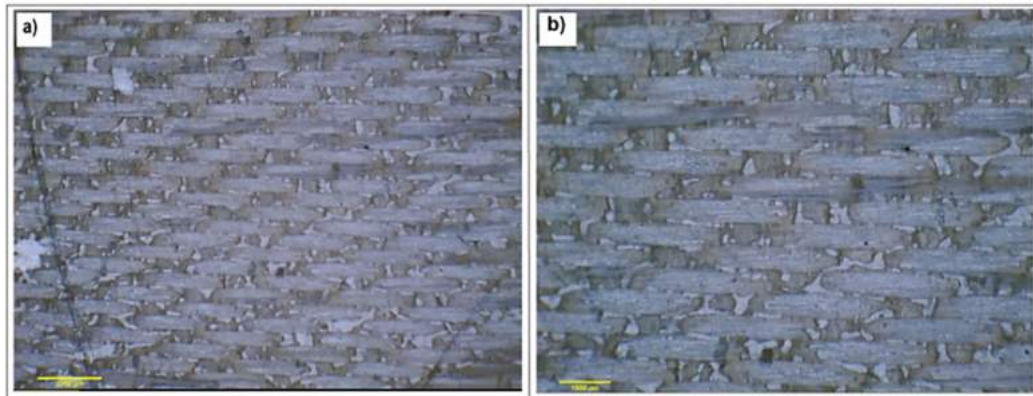
Fonte: Produção do próprio autor

Verificou-se que na amostra anodizada com o menor valor de potencial, houve uma menor interação entre o compósito e a superfície da liga de alumínio (setas em vermelho), resultando em maior presença de substrato, em comparação com o compósito (setas azuis), demonstrando que a soldagem não foi uniforme em toda a região, apesar de haver um ancoramento na interface da liga AA2024/compósito.

Na Figura 47a observa-se que, praticamente, todo o lado esquerdo da amostra consiste de substrato (extremidade da amostra) e no lado direito há a presença de compósito (parte média da amostra). Esta falta de uniformidade na aderência pode ter sido causada pelo direcionamento da chama durante o processo de soldagem, pois a chama é direcionada da extremidade para a o meio da amostra, sendo essa região a que recebe maior quantidade de calor. Na Figura 47b, é mostrada a imagem com maior ampliação (10x). Observa-se que o compósito impregnado na superfície da liga formou uma pequena impressão no formato das fibras, mas, devido à pequena ancoragem do compósito essas marcas não são contínuas.

A Figura 48a mostra a imagem da região rompida da liga AA2024 anodizada com os parâmetros 15V/12,5 min, após o ensaio de *Lap Shear*. Observa-se uma melhor ancoragem no processo de soldagem, que pode ser verificado pela presença de resíduo da matriz polimérica aderido em toda a extensão da superfície da liga. Com ampliação da imagem para 10x (Figura 48b) pode-se visualizar melhor como toda a região da liga apresenta polímero residual, após o rompimento da amostra.

Figura 48 - Região rompida da amostra da liga AA 2024 anodizada em 15V/12,5 min:a) aproximação de 6,5x ; b) aproximação de 10x.

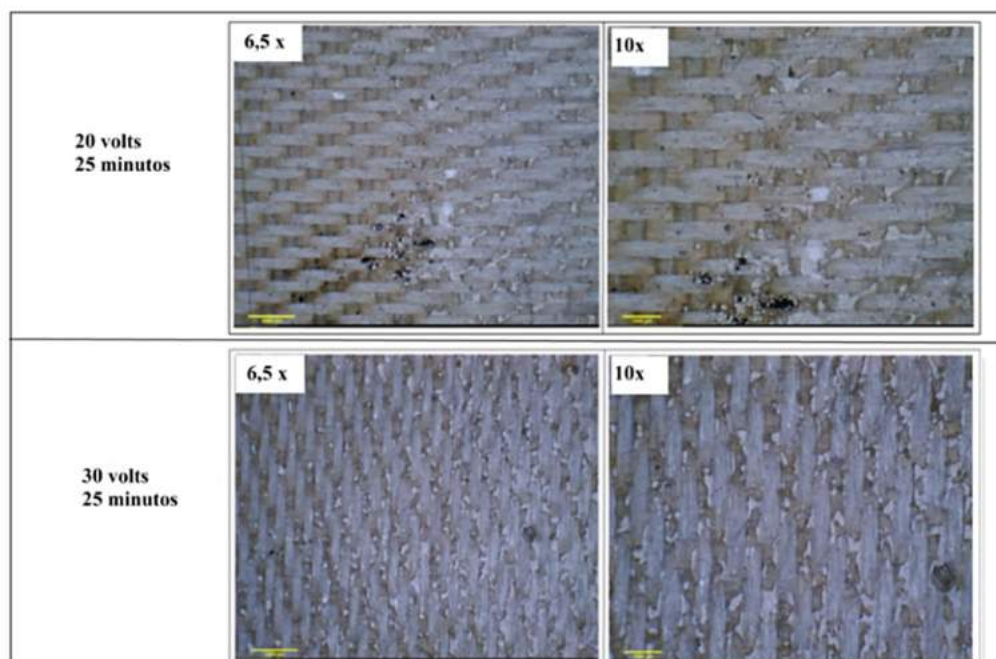


Fonte: Produção do próprio autor

Na amostra anodizada com potencial de 20 V e tempo de 25 minutos e 30 V e 25 minutos observa-se uma maior quantidade de compósito impregnado na superfície da liga de alumínio, evidenciando uma maior interação entre a superfície da liga e o compósito. Na Figura 49, com uma ampliação de 6,5 x é notada a impressão no formato das fibras do compósito. Com a aproximação de 10x verifica-se que as amostras soldadas com os dois parâmetros acima apresentaram, praticamente, o mesmo resultado, sendo poucas as regiões de substratos não preenchidas pelo polímero.

Isso mostra que nos parâmetros com maior potencial de anodização obteve-se maior ancoragem entre a liga de alumínio e o compósito. Portanto, com os parâmetros iniciais de anodização (potencial e tempo) obtidos foi possível, por meio de planejamento experimental, obter a melhor condição de anodização para a liga AA2024 e o compósito PEI-fibra de vidro.

Figura 49 – Região rompida das amostras da liga AA 2024 anodizadas em 20V/25 min e 30V/25

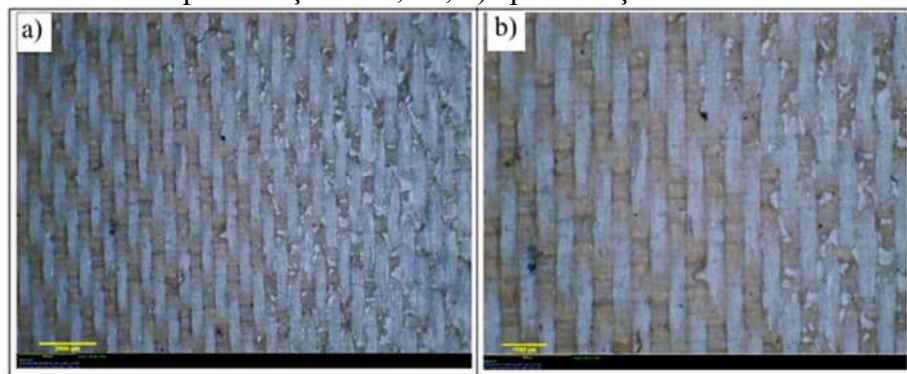


Fonte: Produção do próprio autor

Na melhor condição de anodização (10V/20min) pode se verificar que houve uma impregnação em toda a região da liga de alumínio, sendo possível observar o formato das fibras impressas na superfície do metal (Figura 50a). Nessa condição fica evidenciado que a camada de óxido formada é bastante aderente, indicando que a condição de potencial e tempo obtida por meio do planejamento experimental foi ideal para que houvesse uma boa ancoragem do compósito.

Na Figura 50 b pode-se observar a impressão das fibras com maior clareza. Na condição de 10V/20min, ao contrário das condições com maior potencial e tempo de anodização, um potencial baixo (10 V) e um tempo relativamente longo (20 min) contribuíram para a maior resistência da junta. Isso pode indicar que o tempo de anodização pode influenciar no crescimento da camada tanto quanto potenciais mais elevados.

Figura 50 - Região rompida da amostra da liga AA 2024 anodizada em 10V/20 min:a) aproximação de 6,5x ; b) aproximação de 10x.



Fonte: Produção do próprio autor

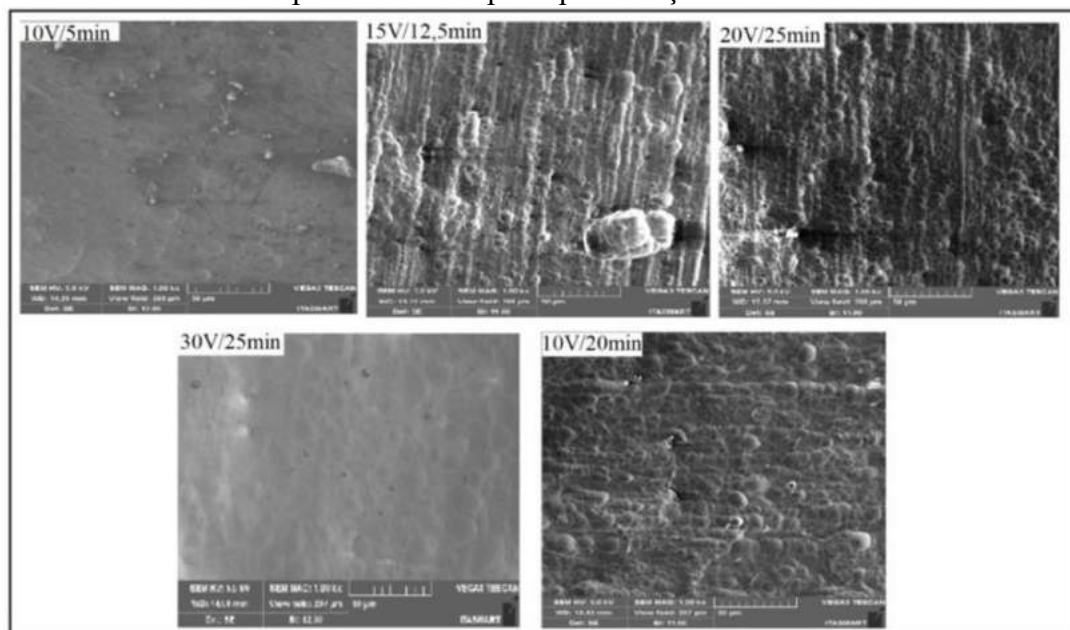
4.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para um melhor compreensão dos fatores que podem influenciar na soldagem da liga AA 2024 com PEI/Fibra de vidro, foram realizadas as análises por microscopia eletrônica de varredura da superfície da liga anodizada nas diferentes condições de potencial e tempo. Foi verificado que a morfologia do óxido apresenta um papel fundamental no ancoramento e, conseqüentemente, na resistência mecânica da junta soldada, visto que o processo de adesão entre os materiais dissimilares acontece principalmente por capilaridade.

A Figura 51 mostra as imagens obtidas por MEV nas diferentes condições de anodização. Nota-se uma diferença significativa da morfologia do óxido formado, resultando numa superfície mais ou menos rugosa, de acordo com o potencial e tempo aplicados. A maior rugosidade da camada porosa de óxido formada sobre a liga de alumínio, durante processo de anodização, pode determinar se a união entre os materiais será eficaz.

Na condição de 10V/5min, observa-se uma superfície menos rugosa, comparada às demais condições, apresentando uma superfície mais uniforme sem muitas alterações na morfologia em sua superfície, o que pode ser atribuído à formação de um óxido mais compacto. Com o aumento do potencial e do tempo para 15 V/12,5 min nota-se uma superfície mais heterogênea com maior rugosidade, justificando o aumento de resistência mecânica no ensaio de *Lap Shear*. Na condição de 20V/25min verifica-se um rugosidade ainda maior, com um superfície mais irregular, com maior número de cavidades profundas, idicando que o aumento de postencial resulta no aumeto de rugosidade.

Figura 51 – Imagens MEV da superfície da liga AA 2024 anodizada nas diferentes condições de potencial e tempo. Aproximação de 1000x.



Fonte: Produção do próprio autor

Na literatura, estudos realizados por Jothi (2020), onde amostras de liga de alumínio foram anodizadas por 30 minutos com potenciais de 5 V, 10 V, 15 V e 20 V, também foram observados resultados semelhantes, ou seja, um aumento de rugosidade para potenciais mais elevados. Este comportamento foi atribuído, pelos autores, ao maior ataque do eletrólito à superfície da liga com o aumento do potencial de anodização, sendo a maior rugosidade no potencial de 20V.

Na condição de 30V/25min observou-se um comportamento inverso, sendo apresentada uma superfície menos rugosa que as demais. Essa mudança de aspecto pode ser atribuída à deterioração da camada anodizada e ao acúmulo de hidróxido de alumínio presente na solução, sendo responsável por cobrir dos poros, resultando em uma superfície com aspecto mais liso. Esse comportamento é evidenciado em Girginov et al. (2017) ao estudar o comportamento da anodização na morfologia da liga AA 2024. De acordo com os autores, as amostras da liga de alumínio foram anodizadas galvanostaticamente em 15 mA/cm^2 , nos intervalos de tempo de 12, 24 e 48 min, onde a amostra de maior tempo apresentou um aspecto mais liso, indicando que este parâmetro tem papel fundamental na morfologia da superfície do material.

Na anodização de 10V/20min foi apresentado um aspecto morfológico mais homogêneo, não apresentando cavidades profundas como encontrado nas amostras de 15 V e

20 V. Esse comportamento pode indicar que um fator importante na morfologia do óxido a ser considerado é sua homogeneidade, mesmo não apresentando uma maior rugosidade, a homogeneidade do filme indica um maior intertravamento mecânico da junta soldada.

4.11 ABSORÇÃO DE UMIDADE DAS AMOSTRAS IMERSAS

Os ensaios de imersão foram realizados com as amostras soldadas, na melhor condição, de acordo com o planejamento experimental (10 V/20min). As amostras de junta soldada foram imersas em água do mar sintética nas temperaturas de 30 °C e 60 °C, sendo realizada a medição de massa das amostras durante 15 dias. A partir destes valores foi calculada a porcentagem de absorção de água pelo compósito em função do tempo de imersão. As amostras foram pesadas diariamente para verificar a sua variação de massa. A Tabela 21 apresenta a ganho de massa do compósito PEI-fibra de vidro e cada período de sua pesagem.

A amostra imersa em 30 °C apresentou maior absorção de umidade, sendo que a partir de 48 h mostrou uma tendência de estabilização, enquanto a amostra imersa em 60 °C apresentou estabilização a partir de 72 h. A Figura 52 ilustra a curva absorção de umidade em função da raiz quadrada do tempo, sendo possível verificar o ponto onde se inicia o processo de estabilização da absorção de umidade para as amostras em 30 °C e 60 °C.

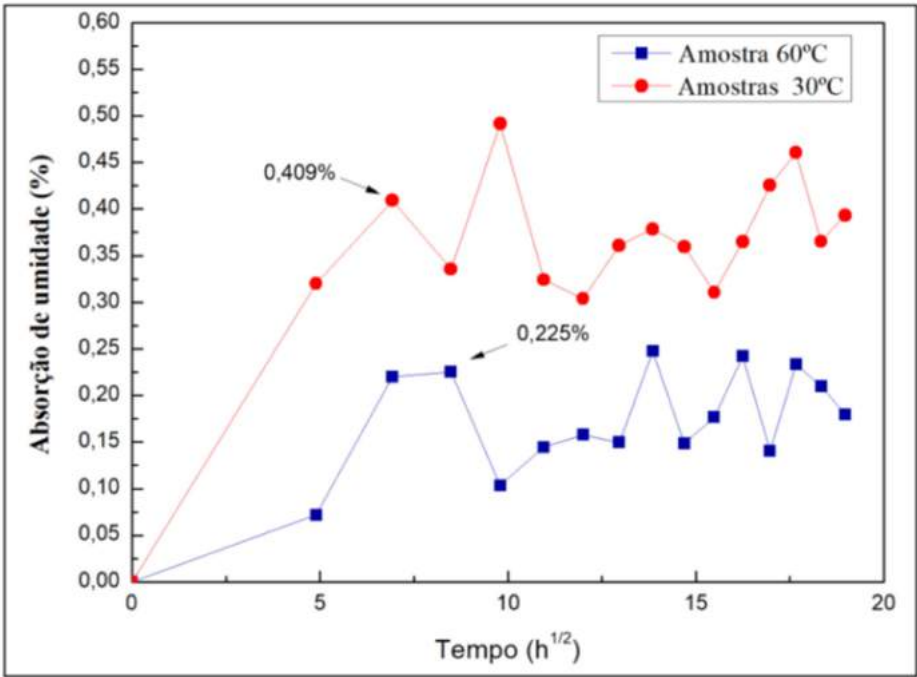
Observa-se que os tempos para o início da estabilização de absorção de umidade das amostras nas diferentes temperaturas são distintos. Em 30 °C e 60 °C os tempos obtidos foram 48 e 72 h, respectivamente, Figura 52. Kootsookos e Mouritz (2013) observaram comportamento similar ao imergir o compósito em água do mar. As curvas de absorção de umidade revelaram um rápido aumento nos três primeiros dias, atingindo seus valores máximos de absorção, indicando uma saturação de umidade. Eventualmente, observa-se uma diminuição de massa com o decorrer do tempo e sua absorção se torna mais lenta devido ao relaxamento de suas cadeias poliméricas e preenchimento de seus poros pela umidade, levando o material a um comportamento de equilíbrio e sua estabilização (MARQUES; 2020).

Tabela 21 – Ganho de massa para a junta AA 2024 e compósito PEI/fibra de vidro.

Tempo de imersão (h)	Absorção de umidade em 30 ° C (%)	Absorção de umidade em 60 ° C (%)
0	0	0
24	0,320	0,071
48	0,409	0,220
72	0,455	0,225
96	0,491	0,254
120	0,504	0,295
144	0,303	0,157
168	0,360	0,149
192	0,378	0,247
216	0,359	0,148
240	0,310	0,176
264	0,365	0,242
288	0,425	0,140
312	0,460	0,233
336	0,365	0,210
360	0,393	0,179

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 52 – Ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo.



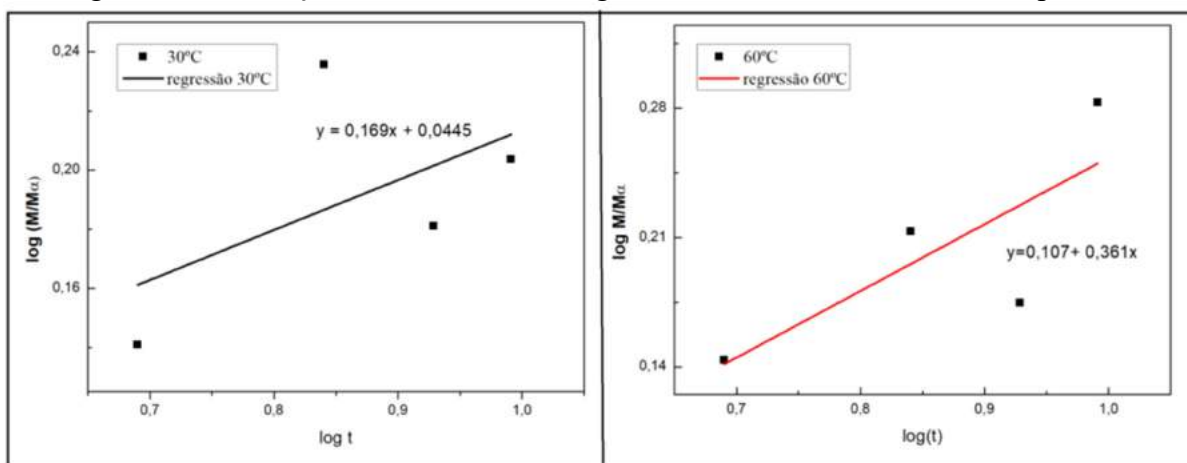
Fonte: Produção do próprio autor

Quando em contato com água, a fibra de vidro reage quimicamente, fazendo com que seus elementos químicos lixiviem, mas esse comportamento não oferece um dano significativo. Quando o compósito é imerso em temperaturas mais elevadas (maior que 50 °C) por longos períodos de tempo pode haver danos como rachaduras da matriz polimérica e descolamento de fibra/matriz devido a cepas de tração induzidas por inchaço ambiental e/ou decomposição química da matriz. (KOOTSOOKOS; MOURITZ, 2013).

Os compósitos termoplásticos como o PEI, têm pouca afinidade pela água, pois são menos polares, porém em seu interior as difusões de moléculas de água causam o aumento seu volume livre entre as cadeias, esse comportamento faz com que o material se expanda, comprometendo suas propriedades mecânicas e viscoelásticas devido ao processo de plasticização (rompimento das ligações de Van der Waals entre as cadeias poliméricas). Essa difusão de água pode não ocorrer por meio de interações polares, mas também pode ocorrer devido a diferença do tamanho das moléculas de polímero. A taxa de difusão é maior em regiões amorfas por apresentar um menor grau de empacotamento do que em regiões cristalinas que apresentam maior grau de empacotamento (MAZUR, 2010).

Por meio de regressão linear da curva de absorção pode-se analisar se o material apresentou um comportamento fickiano. A linha de absorção de umidade é em função da raiz quadrada do tempo de imersão, foram utilizados os quatro primeiros pontos onde o grau de absorção foi mais acentuado. A Figura 53 ilustra os gráficos da regressão linear das amostras imersas em cada temperatura.

Figura 53 - Avaliação de difusividade do ganho de massa nas diferentes temperaturas



Fonte: Produção do próprio autor

A linha de absorção de umidade indicou um comportamento fickiano em ambas as amostras, sendo o gráfico de regressão linear calculado a partir do logaritmo da razão entre o ganho de massa em relação ao tempo pela massa em equilíbrio, $\text{Log} (M_t/M_\alpha)$, em função do logaritmo do tempo, $\text{Log} (t)$. A partir da regressão linear foram obtidos os valores de “n” a partir da equação da reta, ilustrada na equação (4).

$$\frac{M_t}{M_\alpha} = K t^n \quad (4)$$

$$\log \left[\frac{M_t}{M_\alpha} \right] = \log(k t^n) \quad (4.1)$$

$$\log \left[\frac{M_t}{M_\alpha} \right] = \log k + \log n \cdot \log(t) \quad (4.2)$$

$$Y = b + nx \quad (4.3)$$

Onde M_t = relativo ao ganho de massa com relação ao tempo t; M_α = ganho de massa no equilíbrio e k e n são constantes.

A partir destas informações foi possível calcular o coeficiente de difusão da água (D) no material, sendo o cálculo ilustrado pela equação (5).

$$D = \frac{b^2 \cdot n^2 \cdot \pi}{4^2} \quad (5)$$

Onde D é o coeficiente de difusão (mm^2/h); b é a espessura da amostra (mm); n é o coeficiente angular. A Tabela 22 apresenta os valores de “n” e “D” para os materiais imersos em diferentes temperaturas.

Tabela 22 - Valores de coeficiente angular (n) e coeficiente de difusão (D).

Temperatura (°C)	n	D (mm²/h)
30	0,169	0,20
60	0,361	0,92

Fonte: Produção do próprio autor.

As amostras imersas nas temperaturas de 30°C e 60°C apresentaram valor de n menor que 0,5, mostrando um comportamento fickiano em ambas as condições de imersão, sendo sua taxa de difusão menor que a mobilidade dos segmentos. A alta absorção de umidade nas amostras de 60 °C é atribuída ao dano sofrido pela matriz e na interface fibra – matriz, que leva o aumento de cavidades internas fazendo com que compósito continue absorvendo água. Devido ao enfraquecimento de suas ligações interfaciais fibra/matriz, como resultado de uma alta absorção em decorrência à capilaridade faz que a matriz polimérica falhe em atenuar vibrações externas a fibra.

4.12 ENSAIOS *LAP SHEAR* (LSS) DAS AMOSTRAS IMERSAS

Após o período de 15 dias de imersão em água do mar sintética, nas temperaturas de 30 °C e 60 °C, foi realizado o ensaio de LSS para verificar se houve comprometimento da junta soldada da liga AA 2024 e PEI-fibra de vidro. Foram utilizadas cinco amostras para cada condição, totalizando 15 amostras, sendo feito a média e o desvio padrão de cada condição. Os ensaios foram realizados com as amostras na melhor condição de anodização (10V/20min). A Tabela 23 apresenta os valores de *Lap Shear*.

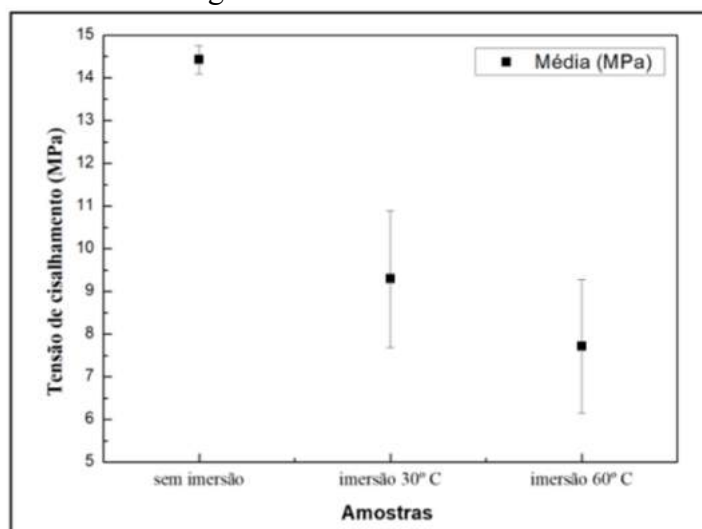
Tabela 23 - Valores do ensaio de *Lap Shear* das amostras soldadas, antes e após os ensaios de imersão em água do mar sintética.

Valores de LSS (MPa)			
Amostra	Sem imersão	Imersão 30 °C	Imersão 60 °C
1	14,17	9,94	6,65
2	14,51	11,65	7,67
3	14,98	7,01	10,38
4	13,72	8,11	8,09
5	14,02	9,75	5,76
Média	14,42	9,29	7,71
Desvio padrão	0,33	1,59	1,56

Fonte: Produção do próprio autor.

Ao verificar a resistência da junta soldada das amostras imersas em comparação com as amostras sem imersão foi constatado que ao ficar em imersão houve perda da sua resistência mecânica, sendo que a maior perda foi na temperatura de 60 °C, que apresentou uma resistência de 7,71 MPa, havendo uma diminuição de cerca de 47 % da resistência em comparação com o material sem imersão. Já, a amostra imersa em 30 °C apresentou uma menor perda em sua resistência mecânica, em comparação ao material sem imersão de cerca de 35 %. A Figura 54 apresenta o gráfico com a média e o desvio padrão de cada condição.

Figura 54 – Valores médios de resistência à tração (LSS) das juntas soldadas antes e após imersão em água do mar sintética em 30 ° e 60 °C.



Fonte: Produção do próprio autor.

Essa perda na resistência observada resulta da penetração da água do mar na junta soldada devido a vazios formados durante o processo de soldagem. Quando o compósito é exposto a temperaturas mais elevadas há o relaxamento de suas cadeias e aos danos na matriz polimérica decorrente da imersão, fazendo que haja a diminuição da sua carga à tração. Este comportamento é visto no estudo realizado por Ibrahim et al. (2013), onde o material compósito foi imerso em água por duas semanas nas temperaturas de 50 °C, 70 °C e 90 °C. De acordo com os autores, na segunda semana de imersão verificou-se uma maior degradação da junta em temperaturas mais elevadas. A maior taxa de absorção de umidade reflete diretamente na perda de resistência à tração do material compósito.

4.13 ILSS DAS AMOSTRAS IMERSAS

Com base no melhor parâmetro obtido pelo modelo estatístico foi realizado o ensaio de ILSS nas amostras de junta soldada da liga AA 2024 e PEI-fibra de vidro, antes da imersão e após o período de imersão (15 dias) em água do mar sintética, nas temperaturas de 30 °C e 60 °C, para avaliar o cisalhamento interlaminar nas diferentes condições. Entretanto, como verificado por Reis (2021), por se tratar da soldagem de materiais dissimilares, esta análise verifica o cisalhamento no compósito, onde, de acordo com o autor, foi alcançado um valor de 25 MPa no processo de soldagem por OFW.

Foram utilizadas cinco amostras em cada condição para se verificar a resistência ao cisalhamento em diferentes temperaturas de imersão. A partir dos resultados obtidos, procurou-se verificar se houve degradação no material durante esse tempo e se isso resultou em perda na resistência das amostras. A Tabela 24 apresenta os valores médios e o desvio padrão em cada condição.

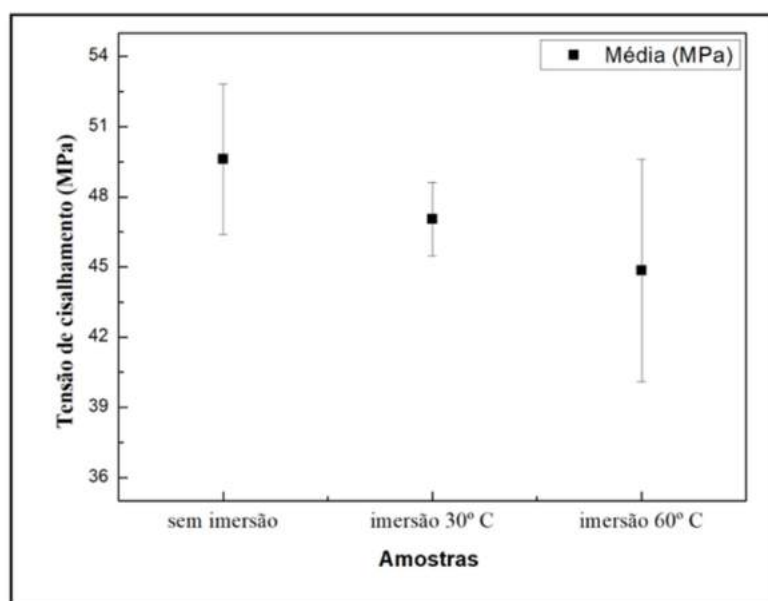
Tabela 24 - Valores de tensão de cisalhamento (ILSS) das juntas soldadas antes e após imersão em água do mar sintética em 30 ° e 60 °C.

Valores de ILSS (MPa)			
Amostras	Sem imersão	Imersão 30 °C	Imersão 60 °C
1	49,35	44,59	41,39
2	48,89	48,74	41,89
3	42,51	46,88	41,21
4	54,84	48,74	53,64
5	44,79	42,22	46,13
Média	49,61	47,04	44,85
Desvio padrão	3,20	1,57	4,75

Fonte: Produção do próprio autor.

Como pode ser observado na Tabela 24, as amostras imersas na temperatura de 60 °C apresentaram uma diminuição da resistência interlaminar cerca de 10 % em comparação com a amostra que não foi imersa. A Figura 55 apresenta o gráfico com a diferença de resistência em cada temperatura estudada.

Figura 55 – Valores médios de tensão de cisalhamento (ILSS) das juntas soldadas antes e após imersão em água do mar sintética em 30 ° e 60 °C.



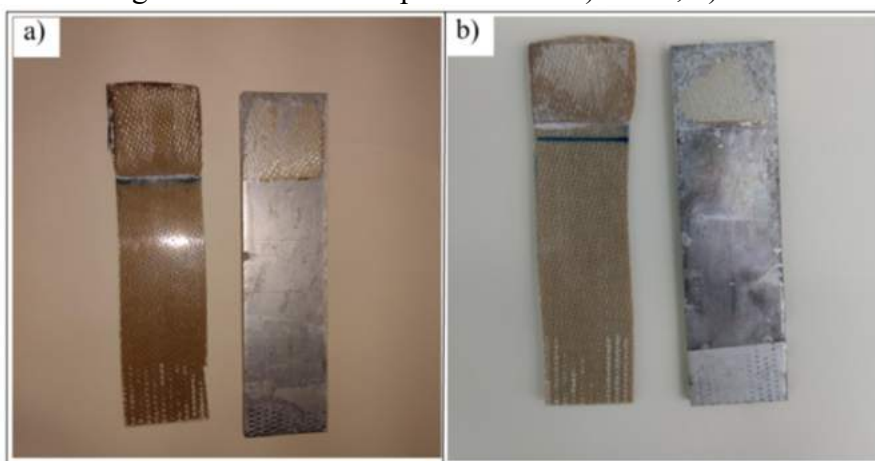
Fonte: Produção do próprio autor.

A amostra imersa a 30 °C apresentou uma perda um pouco menor em relação às amostras que não foram imersas, sendo essa perda de cerca de 5 %. Isso demonstra que quanto maior a temperatura, maior é a degradação no material e maior a perda de suas propriedades. Mesmo não apresentando uma perda significativa, ao longo do tempo essa perda poderia ser maior. Mesmo perdendo resistência mecânica durante o processo de imersão, a anodização das amostras se mostrou eficaz, pois esse estudo mostra um aumento cerca de 50 % de resistência interlaminar em comparação aos resultados, quando este método de soldagem foi desenvolvido (REIS, 2021).

4.14 MICROSCOPIA ÓPTICA DAS AMOSTRAS IMERSAS (LSS)

Após o período de 15 dias de imersão em água do mar sintética, as amostras soldadas foram retiradas e submetidas a ensaios de LSS para verificar se houve comprometimento de sua resistência à tração e compressão, respectivamente, da junta. Após o rompimento das amostras nos ensaios de LSS foram analisadas as superfícies dos materiais imersos tanto em 30 °C como em 60 °C. Ficou evidente que houve penetração de solução através da junta soldada, devido à presença de vazios durante o processo de soldagem. A liga de alumínio sofreu corrosão durante o período de 15 dias em imersão. Verificou-se que as amostras imersas em 30 °C (Figura 56a) sofreram menor dano. Já, as amostras imersas em 60 °C (Figura 56b) apresentaram um processo de corrosão mais acentuado, com maior corrosão na região rompida da junta. Houve uma diminuição do valor de resistência à ruptura da junta soldada, em comparação com as amostras sem imersão.

Figura 56 - Amostras após imersão: a) 30 °C; b) 60 °C



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 57 apresenta a região rompida da amostra imersa a 30 °C. A região rompida apresenta grandes regiões com corrosão em decorrência da penetração da solução, como é visto nas setas vermelhas. É possível notar que o processo de corrosão começou de forma mais intensa nas extremidades. Também se pode observar que há material polimérico impregnado na superfície da liga de alumínio, mas em menor quantidade, em comparação com o material sem imersão, evidenciando uma falha coesiva, visto que um pouco da matriz polimérica ficou impregnada na superfície do alumínio.

Esse processo de ataque corrosivo pelo eletrólito à liga é comum em uniões compósito/alumínio, sendo esse processo acelerado em função da do aumento de temperatura. Este comportamento foi verificado no estudo de Najafi et al. (2018) e Monika e Bienias (2020), em laminados de liga de alumínio e fibra de vidro na presença de água do mar. Após o período de imersão, os autores destacam que o alumínio apresentou pites e corrosão intergranular, porém esse comportamento não foi analisado neste estudo.

Figura 57 - Região rompida da liga AA 2024 após imersão em água do mar sintética, a 30 °C. Aproximação de 6,5 x

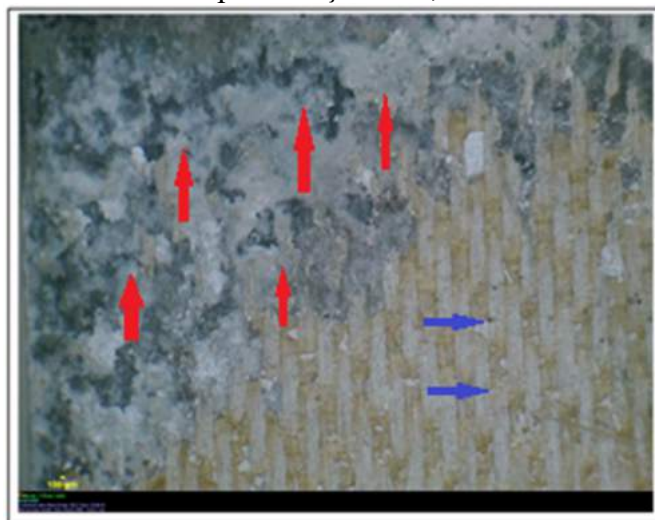


Fonte: Produção do próprio autor

A agressividade do ataque ficou mais evidente na amostra imersa em 60 °C (Figura 58). Apesar de haver matriz polimérica impregnada na superfície da liga de alumínio (setas azuis), foi verificado que uma grande parte da superfície do metal foi tomada pela corrosão (setas vermelhas), devido a penetração da solução salina na junta soldada. Este comportamento

revela que, em temperaturas mais elevadas, o ataque foi mais intenso tomando quase toda a superfície da junta.

Figura 58 - Região rompida da liga AA 2024 após imersão em água do mar sintética, a 60 °C. Aproximação de 6,5 x

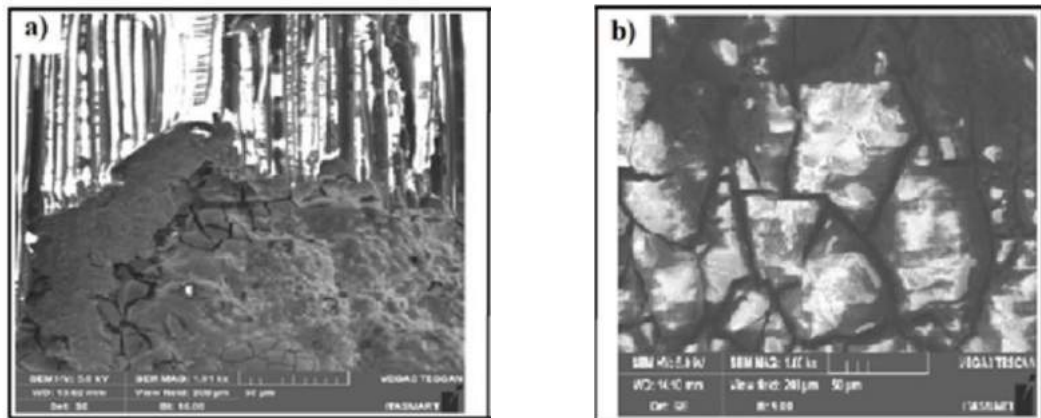


Fonte: Produção do próprio autor

Após o ensaio de imersão, foi realizada uma análise do produto de corrosão formado na superfície da liga AA 2024. A Figura 59 apresenta o material oxidado nas temperaturas de 30 °C e 60 °C. Em ambas as temperaturas, o produto da corrosão formado na presença da água salina. Na condição de 30 °C (Figura 59a), é apresentada a região entre o óxido e a matriz polimérica impregnada, mostrando um comportamento menos agressivo da corrosão. Na temperatura de 60 °C (Figura 59b), nota-se a presença de um processo corrosivo mais intenso e uma maior quantidade de produtos de corrosão, que evidencia o comportamento mais agressivo em temperaturas mais elevadas.

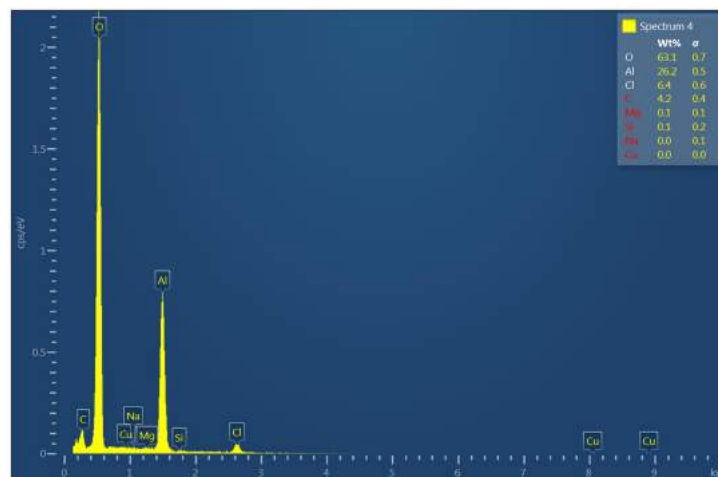
Para a verificação do produto de corrosão foi realizada a análise por EDS dos produtos formados em 30 °C e 60 °C. A Figura 60 apresenta o espectro de EDS indicando, além do alumínio (26,2 % em massa), outros elementos (magnésio 0,1 % e silício 0,1 %, em massa) presentes na composição da liga e uma grande quantidade de oxigênio (63,1 %, em massa), indicando que o principal produto da corrosão é óxido ou óxido hidratado de alumínio. Também foi detectada a presença de cloro (6,4 %, em massa), provavelmente pela incorporação do eletrólito no produto de corrosão.

Figura 59 - Imagens do produto de corrosão das amostras imersas: a) 30°C b) 60°C; aproximação de 1000x



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 60 – Espectro de EDS do produto de corrosão formado sobre a liga AA 2024, após o ensaios de imersão.

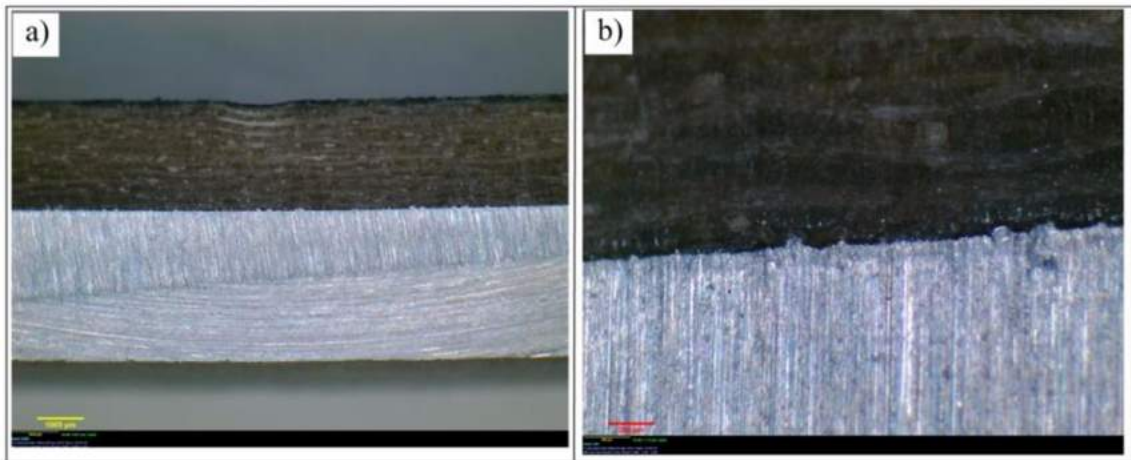


Fonte: Produção do próprio autor

4.15 MICROSCOPIA DA JUNTA SOLDADA (ILSS)

O ensaio de ILSS foi realizado no intuito de ver o cisalhamento interlaminar do compósito. Por se tratar de soldagem de materiais dissimilares, os efeitos deste ensaio só é visto nos compósitos em si, sendo que as propriedades da liga de alumínio não são afetadas diretamente por este ensaio. As amostras analisadas foram soldadas na melhor condição de ansodização (20 V/10 min), sendo realizado o ensaio de ILSS antes e após o período de imersão em 30 °C e 60 °C. A Figura 61 apresenta a amostra ensaiada sem imersão, com aumentos de 6,8x e 40x.

Figura 61 – Imagem de ILSS da junta soldada sem imersão: a) aproximação de 6,8x; b) aproximação de 40x.

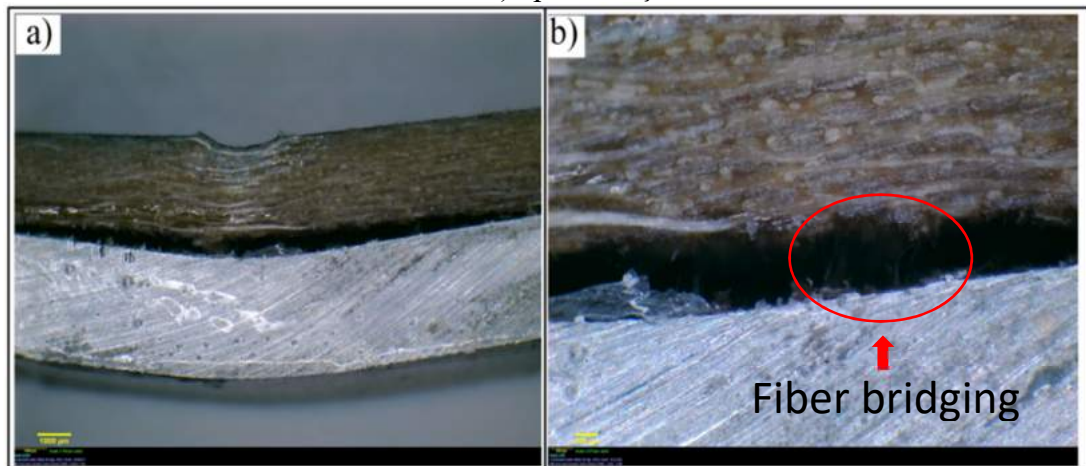


Fonte: Produção do próprio autor

A análise realizadas por meio de microscopia óptica, das amostras sem imersão, após serem ensaiadas por ILSS, mostraram que na região onde foi feita a pressão do cutelo nota-se uma pequena deformação nas fibras (Figura 61a). Este comportamento é conhecido como deformação inelástica. Ao se analisar a região da junta soldada com maior aumento (Figura 61b) observa-se o início do cisalhamento interlaminar, caracterizado por pequenas regiões rompidas entre o compósito e a liga de alumínio.

Após a imersão da amostra por um período de 15 dias, o ensaio de ILSS foi repetido, sendo observado que os defeitos ficaram mais acentuados, como apresentado na Figura 62, para a amostra imersa em 30 °C.

Figura 62 - Imagem de ILSS da junta soldada após imersão em 30 °C: a) aproximação de 6,8x; b) aproximação de 40x.

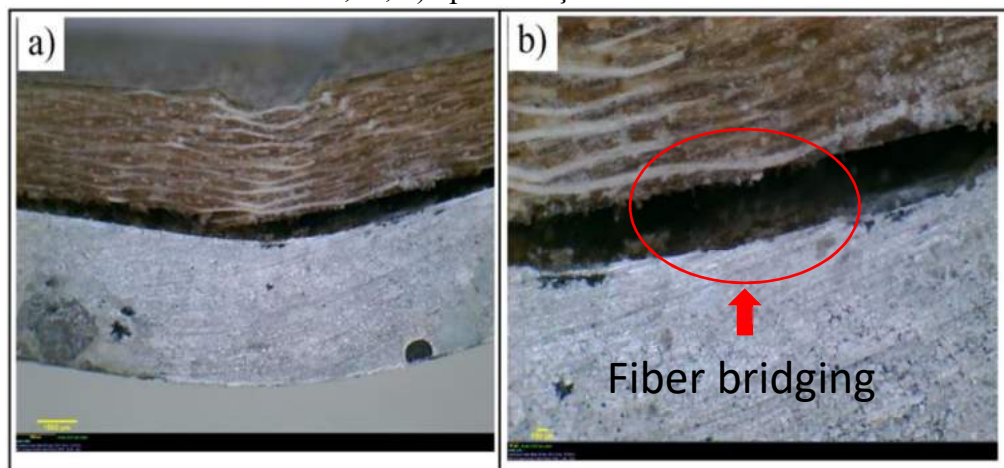


Fonte: Produção do próprio autor

Nota-se que na amostra imersa, o local que apresenta deformação inelástica (Figura 62a) é bem mais acentuada que na amostra não imersa, sendo a deformação da superfície e das fibras mais visível, em decorrência da pressão exercida pela ferramenta do ensaio. Neste ensaio, observa-se o cisalhamento interlaminar. Na Figura 62b??? pode-se verificar o comportamento de cisalhamento interlaminar bem mais aparente, sendo que na região em questão ocorre o completo descolamento do compósito da superfície da liga de alumínio. Este fenômeno, conhecido como *Fiber bridging*, é característico do descolamento entre as interfaces por causa do seu cisalhamento. Este comportamento é decorrente do arranjo das fibras nas camadas adjacentes e interfaces fracas. Em laminados com maiores quantidades de fibras em sua estrutura, as fibras de camadas adjacentes fazem a ponte do plano de delaminação e atuam como retentores de rachadura, devido ao qual a resistência à delaminação e a tenacidade à fratura interlaminar aumentam (KHAN, 2019).

A amostra imersa em 60 °C (Figura 63a) também foi analisada, sendo verificado o mesmo comportamento do observado na imersão a 30 °C, porém de uma maneira mais agressiva.

Figura 63 - Imagem de ILSS da junta soldada após imersão em 60 °C: a) aproximação de 6,8x; b) aproximação de 40x.



Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 63b fica evidente a falha coesiva na interface metal/compósito, visto que pode-se verificar a separação e ruptura das fibras, efeito da delaminação no material compósito. Efeito similar também foi observado nos estudos realizados por Botelho et al. (2006), onde foi avaliado o aspecto dos laminados fibra de vidro e alumínio após condicionamento higrotérmico de 6 semanas, sendo a degradação do material atribuída à

plastificação induzida pela umidade e temperatura. A deformação não foi maior devido a junta soldada ter maior resistência a flexão que a tração, visto que a perda de sua resistência mecânica foi menor nesse ensaio, contudo, o efeito higrotérmico não foi mais prejudicial devido a resistência causada pela liga de alumínio, onde o material metálico evitou um maior cisalhamento do composto.

Outro autor que também estudou este aspecto em laminados foi Najafi et al. (2018), que verificou a influência da água do mar nos laminados híbridos de fibra de vidro e carbono para aplicação naval. Os autores verificaram que as propriedades de flexão dos materiais em ambos os tipos de reforços foram afetadas em água salgada fervente a 100°C em ciclos, ocorrendo uma perda de 20% a 30 % dessa propriedade.

Em ambas as condições se notam que a água em temperaturas maiores causa uma maior degradação nos materiais compósitos, sendo que ao que parece tanto o tempo de imersão quanto a temperatura são fatores bastante agressivos para os materiais, podendo levar a danos irreversíveis como quebra da matriz polimérica, delaminação e divisão de fibra, afetando sua durabilidade.

5 CONCLUSÃO

O planejamento experimental foi aplicado para a otimização dos parâmetros de anodização da liga AA2024 na soldagem com PEI-Fibra de vidro por OFW, mostrando-se efetivo com um valor de confiabilidade (R^2) de 85,25 %. Os parâmetros de potencial e tempo de anodização de 10 V e 20 min, respectivamente, para um valor de resistência à tração da junta de 14 MPa foram obtidos do tratamento estatístico e confirmados experimentalmente a partir dos ensaios de anodização fosfórica da liga de alumínio e pelo ensaio de *Lap Shear* (variável resposta).

No estudo da resistência à corrosão em solução de NaCl 3,5 %, as ligas AA 2024 anodizadas apresentaram valores de potencial em circuito aberto, após imersão por 24 h, mais positivos que os obtidos para a liga não anodizada, indicando a formação de um óxido protetor sobre a liga. O valor mais positivo (+0,14 V) foi obtido para a condição de 10 V/20 min. A análise das curvas de polarização revelou que, de um modo geral, com o aumento de potencial e do tempo de anodização há um aumento da resistência à corrosão da liga, indicada pela diminuição dos valores de densidade de corrente de corrosão. A amostra na melhor condição de anodização (10 V/20min) foi a que apresentou a menor densidade de corrente dentre as amostras estudadas, evidenciando que, mesmo em potenciais baixos (10 V), o aumento do tempo de anodização também pode resultar no aumento na resistência à corrosão.

A análise por macroscopia óptica da região rompida da junta, após a soldagem e o ensaio de *Lap Shear* (LSS), da amostra anodizada em 10 V/5min, revelou a presença de pequenas regiões com impregnação da matriz polimérica, indicando uma baixa adesão dos materiais. Já, com o aumento do potencial e do tempo para 20 V/25min e 30 V/25min, houve aumento da região impregnada com a matriz polimérica, que se estendeu por praticamente toda a superfície da liga. O mesmo comportamento foi observado para a melhor condição de anodização (10 V/20 min), resultando na maior adesão da liga AA 2024 anodizada e o compósito.

Na caracterização da liga AA 2024 anodizada na melhor condição de anodização (10 V/20min), as medições de espessura da camada, testes de rugosidade e medições de ângulo de contato revelaram um comportamento mais uniforme em comparação com os outras condições, ficando evidente que o óxido formado se apresenta mais homogêneo, com boa rugosidade e hidroflicidade. Isso corrobora com os resultados encontrados dos ensaios mecânicos e técnicas eletroquímicas, podendo afirmar que, nessa condição, o material apresentou maior resistência mecânica e resistência à corrosão.

As características morfológicas do óxido formado sobre a superfície da liga anodizada foram confirmadas a partir das análises de MEV, onde foi verificado que na condição de menor potencial e tempo (10 V/5min), a superfície apresentou um aspecto mais liso, atribuído à presença de um óxido mais compacto. Na condição de maior potencial (30 V/25 min) houve dissolução do óxido e deposição de hidróxido de alumínio sobre a superfície, que também resultou na diminuição da rugosidade. Já, na melhor condição de anodização (10 V/20 min), a análise revelou uma superfície bastante rugosa com aspecto nodular, porém mais homogênea.

A partir dos ensaios de imersão em água do mar sintética, por 15 dias, em 30 °C e 60 °C, foi verificado um comportamento fickiano em ambas as condições de temperatura, porém houve uma maior absorção de umidade para as amostras de 60 °C. Na melhor condição de anodização (10 V/20 min) após o período de imersão ficou evidenciado que há a degradação do material na junta soldada. Nos testes de ILSS e LSS após a imersão foi verificada a perda de resistência mecânica da junta soldada em ambas as temperaturas e, principalmente, em 60 °C. Esse comportamento resulta da degradação das fibras em temperaturas mais elevadas, evidenciando que quanto maior a temperatura de imersão, maior a degradação. Verificou-se um processo corrosivo da liga AA 2024, em 60 °C, que se inicia a partir das extremidades da amostra, decorrente da infiltração do eletrólito na região da junta soldada, causando a degradação.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Otimização do processo de soldagem, por OFW, utilizando GLP, que permita um maior controle da distância e incidência da chama à superfície da amostra e temperatura da chama.
- Fazer um estudo sistemático da influência do tempo de anodização da liga AA 2024 no processo de adesão, pois no presente estudo, o planejamento experimental conduziu à melhor condição de potencial de 10 V/20 min, resultando em valores elevados *Lap Shear* (confirmada experimentalmente), indicando que, para baixos valores de potencial o tempo de anodização tem papel fundamental na resistência mecânica das juntas.
- Aplicação de outros processos de anodização para a liga AA 2024, afim de verificar as propriedades do óxido formado e sua influência no ancoramento entre os materiais.

- Estudar a viabilidade da soldagem da liga AA 2024 com outros materiais compósitos, como por exemplo PEI – fibra de carbono, visando a eficácia da soldagem para outros materiais compósitos.

5.2 PRODUÇÕES CIENTÍFICAS GERADAS

[1] RIBEIRO, M.P.S; BOTELHO, E.C; ABRAHÃO, A.B.R.M; LUCAS, R.R; MARQUES, L.F.B; NAKAZATO, R.Z. **“Estudo dos parâmetros de anodização da liga AA 2024 para soldagem com PEI/Fibra de vidro por oxi-combustível”** In: Anais V Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção da Unesp, Guaratinguetá, 2021.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, A. B. R. M. **Otimização do processo de soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras contínuas para aplicações aeronáuticas**. 2015. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/127942>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- AGEORGES, C. *et al.* Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, Oxford, v. 32, n. 6, 839-857, jun 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00166-4). Acesso em: 20 jan. 2022.
- AHAMAD H. *et al.* Welding of plastics through hot gas technique: a review. **GRD Journals-global research and development journal for engineering**. Ahmedabad, v.1, n.6, p. 71-75, jun 2016. Disponível em: <https://grdjournals.com/uploads/article/GRDJE/V01/I06/0054/GRDJEV01I060054.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2020.
- AGHAMOHAMMADI, H. Effects of various aluminum surface treatments on the basalt fiber metal laminates interlaminar adhesion. **International journal of adhesion and adhesives**. Londres, v 84. p. 184–193. mar 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.03.005>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- ALBIERO, D. *et al.* Gráficos de probabilidade normal para avaliação de mecanismos de distribuição de sementes em semeadoras. **Semina: ciências agrária**. Londrina, v. 33, n. 2, p. 507–518, Abr 2012. Disponível em: doi:10.5433/1679-0359.2012v33n2p507. Acesso em: 20 fev. 2020.
- ALEXANDRINO, E. M. **Compósitos poliméricos de poli (éterimida)/polianilina: preparação e caracterização**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2012.843802>. Acesso em: 27 fev. 2020.
- AMANCIO-FILHO, S. 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 & Inspeção**, São Paulo v.16, n.4, p.387-395, dez 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000400010>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- ANDRE, N. 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 & Inspeção**, São Paulo, v.21, n.1, p.2-15, mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2101.02>. Acesso em: 25 fev. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6834: Alumínio e suas ligas – classificação das têmperas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B117-03: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus**. West Conshohocken, PA, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1002-10**: standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal). West Conshohocken, PA, 20019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5229 / D5229M-14e1**: standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, PA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5868-01**: standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding. West Conshohocken, PA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM NACE / ASTM G31-12a**: Standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals. West Conshohocken, PA, 2012.

BARROS, A. F. **Preparação, caracterização físico-química e avaliação do comportamento térmico e mecânico de blendas de poli (tereftalato de etileno) (PET) e poli (éter imida) (PEI), PET/PEI**". 216 f. Dissertação (Mestrado em físico-química) Curso de ciências, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/6102>. Acesso em: 19 out. 2020.

BATISTA, N. L; BOTELHO, E.C. Influência do intemperismo no desempenho viscoelástico de laminados PEI/fibras de Carbono com aplicações aeroespaciais. In: CBPol - congresso brasileiro de polímeros, 10, 2009. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, 2009, p. 1-7. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/1342.pdf> Acesso em: 14 fev. 2019

BORGES, M. F. **Desenvolvimento de nova geometria de rebite para uso em estruturas híbridas compósito-metal obtidas através do processo de rebitagem por fricção**. 122f. Dissertação (mestrado em engenharia de minas, energia e de materiais) - Universidade do rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/96485>. Acesso em: 23 fev. 2022.

BOTELHO, E. C. *et al.* Elastic properties of hygrothermally conditioned glare laminate. **International journal of engineering science**. São José dos Campos, v.45, n. 1, p. 163-172. Abr 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2006.08.017>. Acesso em: 25 fev. 2022.

BOTELHO, E. C. *et al.* Evaluation of adhesion of continuous fiber-epoxy composite/aluminum laminates. **Journal of adhesion science and technology**. São José dos Campos, v.18, n. 15-16, p. 1799-1813. Out 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/1568561042708377> . Acesso em: 25 jun . 2020.

CAMARGO, J. A. M. **A Influência do shot-peening e das anodizações crômica, sulfúrica e dura sobre a resistência à fadiga da liga Al 7050 – T 7451 de uso aeronáutico**. 2007. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/105367/camargo_jam_dr_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 25 jun . 2020.

CAMARGO, A. *et al.* Caracterización mediante espectroscopia de impedancia electroquímica de películas anódicas crecidas sobre Al 2024-T3. **Revista de la sociedad colombiana de física**. Cali, v. 41, n. 2, p.261-263, abr 2009. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/28321614_Caracterizacion_Mediante_Espectroscopia_de_Impedancia_Electroquimica_de_Películas_Anodicas_Crecidas_Sobre_Al_2024-T3.

Acesso em: 25 jun . 2020.

CASTRO, V. A. **Influência do shot-peening e da anodização crômica na resistência à fadiga da liga de alumínio 7475-T7351**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, fev 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/153436>. Acesso em: 08 jun . 2019.

CINTRA, I. L. R. *et al.* Otimização do processo de soldagem por oxiacetileno para compósito PEI/fibra de carbono. **RBAV – Revista brasileira de aplicações de vácuo**, São José dos Campos, v. 38, n. 1, p. 14-18, maio 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17563/rbav.v38i1.1120>. Acesso em: 08 fev. 2020.

CINTRA, I. R. *et al.* Caracterização de juntas de compósitos Polieterimida/fibra de carbono submetidos a condicionamentos ambientais. **RBAV – Revista brasileira de aplicações de vácuo**. São José dos Campos, v. 39, n. 1, p.77-86, dez 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17563/rbav.v39i1.1162>. Acesso em: 19 fev. 2021

COSTA, A.P. **Efeito do condicionamento ambiental em compósitos soldados de PPS/fibras contínuas**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica- Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/94417>. Acesso em: 19 fev. 2021

DA SILVA, R. V. *et al.* Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. **Revista matéria**. Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 154–161, mar 2008. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762008000100019>. Acesso em: 27 fev. 2021

DICK, P. A. **Anodização sulfúrica e resistência à corrosão da junta dissimilar entre as ligas AA7050 e AA2024 soldadas pelo método friction stir welding**. 2017. 75f. Dissertação (Mestrado em engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/164605> Acesso em: 27 fev. 2021

DOGAN, A; ATAS, C. Variation of the mechanical properties of e-glass/epoxy composites subjected to hygrothermal aging. **Journal of composite materials**. Londres. v. 50, n. 5, p. 637–646, mar 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021998315580451>. Acesso em: 30 ago. 2021

DOMINGUES JUNIOR, N. I. **Estudo do comportamento mecânico da liga Al-Cu 2024 solubilizada e envelhecida para aplicações aeronáuticas**. 2011. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://tede.mackenzie.br/jspui/handle/tede/1323> Acesso em: 14 abr. 2019.

DOMINGUES, L; FERNANDES, J.C.S; FERREIRA, M.G.S. Anodização não poluente de ligas de alumínio. **Corrosão e protecção de materiais**. Lisboa. v. 22, n. 3. jan 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/238092764_ANODIZACAO_NAO_POLUENTE_DE_LIGAS_DE_ALUMINIO. Acesso em: 30 ago. 2021

FARIA, M. C; CIOFFI, M. O. H; BOTELHO, E. C. Análise do Efeito higrotérmico no comportamento em fadiga de compósitos de PPS/fibras de carbono. **Polímeros**. São Paulo, v. 22, n. 1, p. 7–12, jan 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000001>. Acesso em: 30 set. 2021

FELTRAN, M. B. **Compósitos de PVC reforçados com fibra de vidro: uso de técnicas de processamento convencionais da indústria brasileira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: 10.11606/D.3.2008.tde-28032008-171828. Acesso em: 30 ago. 2021

FIGUEROA, R *et al.* Hydrophobic surface treatments for improving the corrosion resistance of anodized AA2024-T3 alloys. **Electrochimica acta**. Oxford , v. 303. p. 56-66, fev 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.034>. Acesso em: 12 fev. 2021

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. 121f. Dissertação (Mestrado em engenharia de produção) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: 10.11606/D.18.2002.tde-18112002-090421. Acesso em: 14 dez. 2021

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos Editora, 2011. 332 p.

GIRGINOV, C. *et al.* Impact of the anodizing duration on the surface morphology and performance of A2024-T3 in a model corrosive medium. **Materials chemistry and physics**. Amsterdam, v. 198, p. 137-144, set 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.05.049>. Acesso em: 05 mar. 2021.

HAQUE, M. S; SIDDIQUI, M. A. Plastic welding: important facts and developments. **American journal of mechanical and industrial engineering**. Newark, v. 1, n. 2, p. 15-19, 2016. Disponível em: DOI: 10.11648/j.ajmie.20160102.12. Acesso em: 14 dez. 2021

HASHIMOTO, T. *et al.* Investigation of dealloying of S phase (Al₂CuMg) in AA 2024-T3 aluminum alloy using high resolution 2D and 3D electron imaging, **Corrosion science**. Oxford, v.103, p. 157-164, fev 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2015.11.013>. Acesso em: 08 set. 2019

HU, Y. *et al.* Hygrothermal aging effects on fatigue of glass fiber/polydicyclopentadiene composites. **Polymer** . Londres. v. 110, p. 464–472, dez 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2014.10.018>. Acesso em: 11 maio. 2020

IBRAHIM, F. S. *et al.* Effects of hot water aging on failure behavior of mechanically fastened glass fiber/epoxy composite joints. **Composites part B: Engineering**. Oxford, v. 54, p. 59-70. nov 2013. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.073>. Acesso em: 11 maio. 2020.

JOTHI, V. *et al.* Influence of an anodized layer on the adhesion and surface protective performance of organic coatings on AA2024 aerospace Al alloy. **progress in organic coatings**. Amsterdam, v.138, out 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105396> . Acesso em: 12 abr. 2022.

KHAN. R. Fiber bridging in composite laminates: a literature review. **Composite Structures**. Londres.v, 229, p. 1-16, dez 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111418> . Acesso em: 20 abr. 2022.

KAPPMAYER, G. *et al.* Modern machining of advanced aerospace alloys-enabler for quality and performance. **Procedia CIRP**. Amsterdam, v. 1, p. 28–43, jul 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.005>. Acesso em: 31 out. 2019.

KLOCKE, F. *et al.* Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. **CIRP Annals - manufacturing technology**. Amsterdam, v. 64, n. 2 p. 581–604, ago 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.004> Acesso em: 30 out. 2019

KOOTSOOKOS. A; MOURITZ. A.P. Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites. **Composites science and technology**. Oxford, v.64, p. 1503-1511, out 2003. Disponível em: [10.1016/j.compscitech.2003.10.019](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.10.019). Acesso em: 25 jan. 2019

KUMAR. A. M. *et al.* Influence of surface treatment on PEDOT coatings: surface and electrochemical corrosion aspects of newly developed Ti alloy. **RSC Adv - the royal society of chemistry**. Cambridge. v. 8, n.34, p. 19181-19195, ago 2018. Disponível em: [10.1039/C8RA01718B](https://doi.org/10.1039/C8RA01718B). Acesso em: 04 fev. 2022.

LEITE, V. R. Estado da arte dos materiais compósitos na indústria aeronáutica. **Revista ciências exatas**, Taubaté, v. 20, n. 2, fev 2014. Disponível em: <http://periodicos.unitau.br/ojs/index.php/exatas/article/view/2014/1418>. Acesso em: 17 out. 2019

LIONETTO, F; BALLE, F; MAFFEZZOLI, A. Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites. **Journal of materials processing technology**. Amsterdam, v. 247, p. 289–295, set. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.002> Acesso em: 17 out. 2019

MANEGHESSO, A. A. Noções básicas sobre o 2. **Revista corrosão e proteção**. São Paulo p. 36-39, fev 2006. Disponível em: https://www.italteco.com.br/imagens/pdfs/Edicao_19.pdf. Acesso em: 12 nov. 2019

MARQUES, L. S. *et al.* Avaliação dos comportamentos mecânico e térmico de laminados de PPS/fibra de carbono processados em autoclave sob diferentes ciclos de consolidação.

Polímeros. São Carlos v. 20, n. 4, p. 309–314, nov 2010. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282010005000049>. Acesso em: 20 maio. 2022

MARQUES, L. F. B. **Influência do intemperismo no mecanismo da fratura de compósitos soldados PEI/fibra de vidro**. 2020. 121 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/192263>. Acesso em: 20 mar. 2021

MARQUES, P. V; MODENESI, P. J; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3^a. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MAZUR, R. L. **Obtenção e caracterização de compósitos de fibras de carbono/PEKK com aplicações aeronáuticas**. 2010. 142 f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, dez 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/103754> . Acesso em: 03 ago. 2020

MONIKA, O; BIENIAS, J. Corrosion resistance in NaCl environment of fiber metal laminates based on aluminum and titanium alloys with carbon and glass fibers. **Advanced engineering materials**. Weinheim v. 23, n. 3, p. 1438-1656. mar 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adem.202001030>. Acesso em: 14 ago. 2021.

MORETO, J. A. **Estudo da corrosão e corrosão-fadiga em ligas de Al e Al - Li de alta resistência para aplicação aeronáutica**. 2012. 192 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: 10.11606/T.88.2012.tde-22102012-112635 Acesso em: 14 ago. 2021.

NAJAFI, M; DARVIZEH, A; ANSARI, R. Effect of salt water conditioning on novel fiber metal laminates for marine applications. **Journal materials: design and applications**. Londres , v. 233, n. 8, p. 1542-1554. Abr 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1464420718767946> Acesso em: 20 ago. 2021 . Acesso em: 07 set. 2021.

ODEGARD, G. M; BANDYOPADHYAY, A. Physical aging of epoxy polymers and their composites. **Journal of polymer science part B: polymer physics**. Hoboken v. 49, n. 24, p. 1695–1716, out 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/polb.22384>. Acesso em: 12 mar. 2021.

OLIVEIRA, G. H; GUIMARÃES, V. A; BOTELHO, E. C. Influência da temperatura no desempenho mecânico de compósitos PEI/fibras de vidro. **Polímeros**. São Carlos v. 19, n. 4, p. 305-312, abr 2009. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282009000400010> Acesso em: 12 mar. 2021.

OLIVEIRA, G.H; BOTELHO, E.C. Avaliação da resistência á fadiga do compósito de fibras de carbono/pei com aplicações na indústria aeroespacial. In: CECEMM - Congresso dos estudantes de ciência e engenharia de materiais do Mercosul, Florianópolis. **Anais [...]**, Florianópolis, 15,2007.

OLIVEIRA, V. S. *et al.* Estudo de parâmetros para soldagem de compósito PEI/fibra de vidro pelo processo oxi-acetileno. In: CIMATECH. São José dos Campos. **Anais eletrônicos**[...] , São José dos Campos: FATEC,4, 2017, p.6. Disponível em http://www.cimatech.com.br/wp-content/uploads/2018/04/Anais-cimatech_IV_2017.zip. Acesso em: 05 set. 2019.

PALOMINIO, L. E. M. **Caracterização microestrutural e eletroquímica de revestimentos ambientalmente amigáveis aplicados sobre a liga de Al 2024-T3**. 2007. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. . Disponível em: 10.11606/T.3.2007.tde-14012008-093144. Acesso em: 19 set. 2019.

PANNEERSELVAM, K; ARAVINDAN, S; NOORUL HAQ, A. Study on resistance welding of glass fiber reinforced thermoplastic composites. **Materials and design**. Londres, v. 41, p. 453–459, out 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.025>. Acesso em: 27 jan. 2021.

PEREIRA, M. C. *et al.* (2000). Efeito do Tratamento Térmico na Corrosão das Ligas de Alumínio 2024 e 7050 em Meio Salino. **Revista latino americana de metalurgia y materiales**. Caracas, v. 20, n.1, p. 63-66, 2000.

PETERSEN, A. D. M. **Comportamento inibidor da corrosão de antocianinas na liga de alumínio 2024-t3**. 75 f. Dissertação (Mestrado em química). Universidade Federal Do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/153271>. Acesso em: 18 jan. 2021

PRAKASHAIAH, B. G. *et al.* Corrosion inhibition of 2024-T3 aluminum alloy in 3.5% NaCl by thiosemicarbazone derivatives. **Corrosion science**. Oxford, v 136. p 326-338,jul 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.021>. Acesso em: 14 jan. 2021

QUEIROZ, M. C. **Estudo do comportamento de corrosão dos intermetálicos presentes na liga AA2024-T3, por meio de técnicas de microscopia associadas a técnicas eletroquímicas**. 272 p. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/153271>. Acesso em: 02 out. 2020

RACHID, M. S. *et al.* High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. **CIRP Annals - manufacturing technology**. Amsterdam v. 64, n. 2, p. 557-580,jul 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.002>. Acesso em: 22 maio. 2020

REGONE, N. N. **Anodização de ligas de alumínio por corrente pulsada**. 178p. Tese (Doutorado em engenharia mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2004.303543> Acesso em: 02 out. 2020

REIS, J. F *et al.* São Jose dos Campos. Avaliação da soldagem GLP para a junção híbrida do compósito pei/fibra de vidro e alumínio 2024. São José dos Campos. **Anais eletrônicos**[...] , São José dos Campos: FATEC,4, 2017, p.6. Disponível em http://www.cimatech.com.br/wp-content/uploads/2018/04/Anais-cimatech_IV_2017.zip. Acesso em: 07 set. 2019.

REIS, J. F. *et al.* Estudo da soldagem por oxi-combustível (OCW) para a junção híbrida de compósito pei/fibra de vidro e alumínio 2024. In: CIMATECH, São José dos Campos. **Anais [...]**, São José dos Campos: FATEC, 5, 2018, p. 1-10. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.21452/issn2447-5378.v1i5.2018p.6230>. Acesso em: 02 out. 2020

REIS, J. F. **Estudo da soldagem entre alumínio 2024-T3 e compósito PEI/fibra de vidro para aplicação aeronáutica**. 2021. 171 f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/204495> Acesso em: 15 mar. 2022

REZENDE, M. C; COSTA, M. L; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2011. 396 p.

REZENDE, M. C. Fractografia de compósitos estruturais. **Polímeros: ciência e tecnologia**. São Carlos. v. 17, n 3. set 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282007000300003> Acesso em: 18 fev. 2021

SANTOS. A. L. *et al.* Influence of anodization of aluminum 2024 T3 for application in aluminum/Cf/ epoxy laminate. **Composites part B: engineering**. Oxford, v.184, 107718, mar 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107718> Acesso em: 18 fev. 2019

SARHAN, A. A. D; ZALNEZHAD, E; HAMDI, M. The influence of higher surface hardness on fretting fatigue life of hard anodized aerospace AL7075-T6 alloy. **Materials science & engineering A**, Amsterdam, v. 560, p. 377-387, jan 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.082>. Acesso em: 18 fev. 2021

SÔNEGO, M. **Efeitos de degradação e de alterações microestruturais do polímero no desempenho mecânico estático de juntas híbridas de polieterimida (PEI) e alumínio produzidas por F-ICJ**. (Dissertação de mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos .170 p, mar 2016. Disponível em : <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/7561> Acesso em: 03 jul. 2021.

SOUZA, E. W. **Estudo para fabricação de refletores automobilísticos utilizando um material compósito termofixo e um material termoplástico**. 2010. 112f. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, São Paulo, 2010. Disponível em : <http://10.11606/D.85.2010.tde-08082011-102352>. Acesso em: 03 jul. 2021.

SOUSA, F. K. A. D; UJIKE, I; KADOTA, A. Effect of different fiber angles for composite material with fiberglass reinforced on mechanical properties. **International journal of metallurgy & mechanical engineering**, Calcuta v. 4, n. 1, p. 1–6, mar 2016. Disponível em : <http://10.13140/RG.2.1.4394.8405>. Acesso em: 03 jul. 2021.

SOUZA, S. D. B. **Avaliação dos parâmetros de soldagem por resistência para compósitos de PPS/Fibras contínuas com aplicações aeronáuticas**. 2013. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica- Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Disponível em : <http://hdl.handle.net/11449/94386>. Acesso em: 03 jul. 2021.

STAVROV, D ; BERSEE H. E. N. Experimental investigation of resistance welding of thermoplastic composites with metal mesh heating element. In: SAMPE-Europe conference proceedings. **Anais** [...] Paris,18, 2004.

TAMBORIM, S.M. **Revestimentos anticorrosivos à base de silanos sobre a liga de alumínio 2024-T3**. 174 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Programa de Pós - Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009 Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/16169>. Acesso em: 18 fev. 2022.

TORAY ADVANCET COMPOSITE , **Toray cetex TC 1000 premium**. camarillo: toray performance materials corporation., [2020]. Disponível em: https://www.toraytac.com/media/f1142cc2-2c05-4013-afcb-19c937e5c438/ce4IPQ/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoplastic/UD%20tapes,%20prepregs%20and%20laminates/Toray-Cetex-TC1000-Premium_PEI_PDS.pdf. Acesso em: 21 abr. 2022.

VENTURA, A. M. F. M. Os Compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & tecnologia dos materiais**. Lisboa, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, jul. 2009.

VTB – VINER BRASIL TECNOLOGIA. **2024(D16)**. São Paulo: Viner Brasil Tecnologia, [2022]. Disponível em: Doi: <https://vbtec.com.br/index.php/pt/produtos/ligas-especiais-de-aluminio/2024-d16>. Acesso em: 21 abr. 2022.

WAINER, E; BRANDI, S. D; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processo e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1992.

WANG, S.et al. The effect of the microstructure of porous alumina films on the mechanical properties of glass-fiber-reinforced aluminum laminates. **Composite interfaces**, Londres , v. 21, n. 5, p. 381–393, jan 2014. 404, 2010. Disponível em : 10.1080/15685543.2014.868692. Acesso em: 21 set. 2019.

YILMAZ, T; SINMAZCELIK, T. Effects of hydrothermal aging on glass-fiber/polyetherimide (PEI) composites. **Journal of materials science**. Nova York, v. 45, n. 2, p. 399–404, jan 2010. Disponível em : <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3954-1> Acesso em: 04 set. 2019.

YOGANANDAN. G et al. Effect of Anodized Oxide Layer Aging on Wettability of Alkyl Silane Coating Developed on Aerospace Aluminum Alloy. **Metallurgical and materials transactions A**. Nova York, v. 46 p. 337- 346, out 2015. Disponível em : <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2627-0>. Acesso em: 24 set. 2019.

YOUSEFPOUR, A; HOJJATI, M; IMMARIGEON, J. P. Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. **Journal of thermoplastic composite materials**, Londres, v. 17, n. 4, p. 303–341, jul 2004. Disponível em : <https://doi.org/10.1177/0892705704045187> Acesso em: 17 nov. 2019

YIWEI, X et al. Improvement of adhesion performance between aluminum alloy sheet and epoxy based on anodizing technique. **International journal of adhesion and adhesives**, Londres, v. 70, p. 74-80, out 2016. Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.05.007> Acesso em: 17 nov. 2019

ZANGRANDI, A. **Alumínio e suas ligas**: fundamentos metalúrgicos e tecnológicos. Lorena: Gráfica & Editora Santa Teresa, 2008. 104p.

ZHANG, W; FRANKEL, G.S. Anisotropy of localized corrosion in AA2024-T3. **Electrochemical and solid-state letters**, Pennington, v. 3, n.6, p. 268-270, abr 2000. Disponível em : <https://doi.org/10.1149/1.1391121> Acesso em: 17 nov. 2019

APÊNDICE A – Valores do ângulo de contato das amostras anodizadas

Potencial 10 V	Tempo 5 min	Potencial 15 V	Tempo 12,5 min	Potencial 20 V	Tempo 25 min	Potencial 30 V	Tempo 25 min	Potencial 10 V	Tempo 20 min
No.	Mean	No.	Mean	No.	Mean	No.	Mean	No.	Mean
1	18,6	1	15.0	1	8.0	1	9.1	1	8.5
2	18,6	2	15.0	2	8.0	2	9.0	2	8.5
3	18,6	3	14.9	3	8.0	3	8.9	3	8.5
4	18,3	4	16.0	4	9.1	4	10.4	4	6.8
5	18,3	5	15.8	5	9.1	5	10.2	5	6.8
6	18,1	6	15.8	6	9.1	6	10.2	6	6.7
7	17,6	7	24.0	7	10.1	7	9.1	7	9.4
8	17,5	8	24.1	8	10.0	8	9.1	8	9.5
9	17,5	9	24.0	9	10.0	9	9.4	9	9.8
10	21,7	10	22.9	10	9.0	10	12.6	10	8.0
11	21,7	11	22.9	11	9.0	11	12.7	11	8.0
12	21,6	12	22.9	12	9.0	12	13.2	12	7.9
13	19,7	13	18.3	13	10.4	13	10.5	13	8.3
14	19,7	14	18.3	14	10.3	14	10.4	14	8.3
15	19,6	15	18.3	15	10.3	15	10.4	15	8.2
Média	19,14	Média	19,21	Média	9,29	Média	10,34	Média	8,21
desv. Pad	1,4402778	desv. Pad	3,658026183	desv. Pad	0,82822434	desv. Pad	1,37349514	desv. Pad	0,90617634

APÊNDICE B – Valores do ensaio de “ILSS” (Newton) das amostras anodizadas na melhor condição e que foram imersas em água do mar sintética nas diferentes temperaturas.

amostras (30°C)	Potencial (V)	Tempo (min)	ILSS (N)
1	10	20	4281,28
2			4679,28
3			4500,66
4			4679,67
5			4053,79

amostras (60°C)	Potencial (V)	Tempo (min)	ILSS (N)
1	10	20	3974,2
2			4022,33
3			3955,88
4			5149,53
5			4429,14

APÊNDICE C – Valores obtidos dos ensaios de “*Lap Shear*” das amostras soldadas por OFW (GLP). Soldagem probatória para a melhor condição de potencial e tempo de anodização da liga AA 2024.

Experimento	Tempo (min)	Potencial (V)	<i>Lap Shear</i> (MPa)
1	20	10	14,17
2	20	10	14,51
3	5	20	10,40
4	5	20	10,19
5	20	20	11,56
6	20	20	10,09
7	1,89	15	11,65
8	1,89	15	10,68
9	23,11	15	11,11
10	23,11	15	14,07
11	12,50	7,93	11,28
12	12,50	7,93	10,29
13	12,50	22,07	11,50
14	12,50	22,07	9,01

APÊNDICE D – Valores de rugosidade das amostras da liga AA 2024 anodizadas.

Rugosidade Aritmética (Ra) (μm)				
10V/5min	15V/12,5min	20V/25min	30V/25min	10V/20min
0,67	2,42	0,61	0,94	0,87
0,91	0,82	0,34	0,78	0,54
0,71	1,3	0,48	1,39	0,88
0,68	1,41	0,58	1,08	0,55
1,07	0,61	0,65	1,28	4,14

Rugosidade total (Rt) (μm)				
10V/5min	15V/12,5min	20V/25min	30V/25min	10V/20min
6,4	11,8	6,3	9,5	8,4
6	11,9	3,5	6,2	4,9
5,6	9,4	4,2	14,5	10,4
12,5	4,7	5,6	10,2	4
8,6	4,5	11,5	11,7	35,3

Rugosidade (Ry) (μm)				
10V/5min	15V/12,5min	20V/25min	30V/25min	10V/20min
6,1	11,8	5,8	9,5	6,9
5,7	11,1	3,5	6	4,8
5,6	8,4	4	12,7	9
12,5	3,9	5,1	10,2	3,6
7,5	4,5	11,5	11,7	35,3

ANEXO A - Informações sobre o AA 2024-T3 da fornecedora VBT- Viner Brasil Tecnologia

	2024
Tratamento térmico	T351
Densidade, g/cm ³	2,78
Composição química, %	
Al	balanço
Cr	≤0,10
Cu	3,80-4,90
Fe	≤0,50
Mg	1,20-1,80
Mn	0,30-0,90
Outros, cada	≤0,05
Outros, total	≤0,15
Si	≤0,50
Ti	≤0,15
Zn	≤0,25
Propriedades mecânicas	
Resistência a tração, MPa	440
Resistência de escoamento, MPa	290
Alongamento na ruptura, %	18
Medidas, mm	Chapas: 1,0-4,50

Fonte: Viner Brasil (2022)

ANEXO B – Informações do laminado PEI/Fibra de Vidro da empresa Toray Advanced Composites

Toray Cetex® TC1000 Premium PEI


 Toray Advanced Composites

PRODUCT DATA SHEET

DESCRIPTION

Toray Cetex® TC1000 Premium is a high-end thermoplastic composite, utilizing the amorphous PEI polymer for outstanding toughness and an inherently outstanding fire, smoke, and toxicity performance (< 15/15 OSU).

With over 30 years in flight, Toray Cetex® TC1000 Premium is utilized in a consistently growing number of applications. The material has gained a wide array of qualifications at Airbus, Boeing, and many other airframe OEMs. Compared to its semi-crystalline counterparts, Toray Cetex® TC1000 Premium can be used to achieve even shorter cycle times in part production. The material exhibits a superior bondability, which makes it very suitable for hybrid assemblies consisting of different materials.

Toray Cetex® TC1000 is available as a UD tape and as a fabric prepreg with woven carbon, glass, or aramid reinforcements. It is typically supplied in pre-consolidated reinforced thermoplastic laminates (RTLs) of varying thicknesses. Laminates and prepreps are available in black, cream white, gray, and natural (amber) resin colors.

FEATURES

- ▶ Qualified and certified to aerospace OEM specifications
- ▶ Excellent FST performance (OSU < 15/15)
- ▶ Rapid processing with cycle times < 3 minutes
- ▶ Very low moisture absorption
- ▶ Low coefficient of thermal expansion (CTE) and coefficient of moisture expansion (CME)
- ▶ Available in black, cream white, gray, and natural (amber) colors
- ▶ Good chemical resistance
- ▶ Indefinite shelf life at ambient temperature storage

TYPICAL APPLICATIONS

- ▶ Secondary aircraft structures
- ▶ Aircraft interiors: seat shells, ducting channels, galleys, trolleys
- ▶ Facingsheets for structural sandwich panels
- ▶ Multiple material assemblies

TYPICAL NEAT RESIN PROPERTIES

Density (specific gravity)	1.27 g/cm ³ (79.2 lb/ft ³)
T _g (glass transition)	217°C (423°F)
T _m (melt)	N/A (amorphous)
T _p (processing)	320-350°C (610-660°F)

PRODUCT TYPE

PEI (PolyEtherimide) Thermoplastic Resin System

MAIN QUALIFICATIONS

- ▶ ABS 5036
- ▶ ABS 5814
- ▶ ABS 5958
- ▶ ASNA 5045
- ▶ ASNA 5046

Fonte: Toray (2020)

MECHANICAL PROPERTIES

EC6 Glass 300gsm FAW 8HS Woven Fabric Reinforced Laminate 33% RC				
Property	Condition	Test Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ISO 527-4 type 3	557 MPa	81 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ISO 527-4 type 3	27.9 GPa	4.1 Msi
Tensile Poisson's Ratio 0°	RTD	ISO 527-4 type 4	0.18	
Tensile Strength 90°	RTD	ISO 527-4 type 3	495 MPa	72 ksi
Tensile Modulus 90°	RTD	ISO 527-4 type 3	26.5 GPa	3.8 Msi
Compression Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	600 MPa	87 ksi
Compression Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	29.4 GPa	4.3 Msi
Compression Strength 90°	RTD	ASTM D 6641	481 MPa	70 ksi
Compression Modulus 90°	RTD	ASTM D 6641	27.8 GPa	4.0 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ISO 178	815 MPa	118 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ISO 178	26.3 GPa	3.8 Msi
Flexural Strength 90°	RTD	ISO 178	656 MPa	95 ksi
Flexural Modulus 90°	RTD	ISO 178	23.3 GPa	3.4 Msi
In Plane Shear Strength	RTD	AITM 1-0002	107 MPa	16 ksi
In Plane Shear Modulus	RTD	AITM 1-0002	5.0 GPa	0.7 Msi
Tensile Strength (0°)	ETD	ISO 527-4 type 4	467 MPa	68 ksi
Tensile Modulus (0°)	ETD	ISO 527-4 type 4	25.7 GPa	3.7 Msi
Tensile Strength (90°)	ETD	ISO 527-4 type 4	426 MPa	62 ksi
Tensile Modulus (90°)	ETD	ISO 527-4 type 4	24.6 GPa	3.6 Msi
Compression Strength (90°)	ETD	ASTM D6641	269 MPa	39 ksi
Compression Modulus (90°)	ETD	ASTM D6641	26.3 GPa	3.8 Msi
In Plane Shear Strength	ETD	AITM 1-0002	83 MPa	12 ksi
In Plane Shear Modulus	ETD	AITM 1-0002	4.1 GPa	0.6 Msi
Data generated from a limited dataset Fabric style 7781, 50% fiber by volume (Vf), Room Temperature Dry (RTD) at 23°C (73°F), Elevated Temperature Dry (ETD) at 90°C (194°F)				

Cetex®

Fonte: Toray (2020)