

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

Faculdade de Tecnologia de São Paulo – Fatec SP

Tecnologia em Materiais

Wanessa das Graças Barboza

**Caracterização e comportamento em corrosão da liga 2098-T351 Al-Cu-Li após
diferentes acabamentos superficiais**

São Paulo

2021

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Faculdade de Tecnologia de São Paulo – Fatec SP
Tecnologia em Materiais

Wanessa das Graças Barboza

**Caracterização e comportamento em corrosão da liga 2098-T351 Al-Cu-Li após
diferentes acabamentos superficiais**

Trabalho de conclusão de Curso, referente ao Curso
de Tecnologia em Materiais, com ênfase em Metais,
para obtenção do Título de Tecnólogo em Materiais.

Orientador: _____

Dra. Mariana Xavier Milagre

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus pelo dom da vida e por ter me deixado viver intensamente até aqui, me abençoando e dando forças para não desistir de realizar meus sonhos a ele sou eternamente grata.

À minha mãe Maria, por sempre me apoiar nos meus sonhos, mesmo às vezes sem entender, pela paciência e companheirismo.

À Helena e Atila, obrigada por ser minha segunda mãe e irmão quando precisei, por ter me motivado sempre, pelas broncas carinho e atenção.

Agradeço as minhas orientadoras Dr^a. Isolda Costa por ter me proporcionado esta oportunidade, apoio e por ter me mostrado o mundo acadêmico, e à Dr^a Mariana Xavier Milagre que segurou minha mão, auxiliou em todas as etapas, pelos conselhos, puxões de orelha e companhia no laboratório, e por ter me apresentado à corrosão, fica aqui minha eterna gratidão.

Aos companheiros de laboratório João Vitor e Caruline Machado por todo auxílio no laboratório, pelas risadas conselhos e companhia no dia a dia.

À todos os amigos e colegas que participaram comigo nesta caminhada da graduação, Ariane Silva, Beatriz Soto, Brena Peres, Bruno Nogueira, Caio Duarte, Gabriella Omena, Gabriel Pereira e Guilherme Rinaldi, todos sem exceção que me ajudaram e que trouxeram entretenimento e risadas, muito obrigada.

À minha melhor amiga e amigos de longa data, como é bom compartilhar a vida com vocês, obrigada pelas festas, encontros, aniversários, viagens, vocês são muito importantes para mim.

Por todos que me ajudaram na minha jornada em São Paulo, Bruna Leite, Thainá Carvalho, obrigada por serem compreensivas e estarem dispostas a me ajudar sempre que possível, me motivando e me fazendo rir.

A todos os excelentes professores que contribuíram compartilhando seus conhecimentos para comigo.

Agradeço ao CNPq/ PIBIC pelo financiamento da bolsa de iniciação científica da CNEN - PROBIC.

“... ainda que conhecesse todos os mistérios e toda ciência, e ainda tivesse
toda fé (...), e não tivesse amor, nada seria.

“O amor tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta.”

1 Coríntios, 13: 2,7

RESUMO

A terceira geração de ligas Al-Cu-Li é aplicada na indústria aeroespacial devido às suas características microestruturais e propriedades mecânicas. Entretanto, adições de lítio, como elemento de liga, favorecem a suscetibilidade desses materiais à corrosão localizada. Portanto, a aplicação de métodos de proteção contra a corrosão nestes materiais é objeto de estudo em todo o mundo. A liga 2098-T351 é uma liga da terceira geração das ligas Al-Cu-Li que foi desenvolvida para substituir ligas convencionais de Al-Cu da série 2xxx na estrutura de aeronaves. Alguns estudos relacionados à suscetibilidade à corrosão desta liga são encontrados na literatura. Entretanto, estudos relacionados à sua proteção ainda são escassos. Visto que o tipo de acabamento superficial é importante para a adesão e bom desempenho das camadas de proteção contra a corrosão, subsequentes; este trabalho é um estudo preliminar sobre a caracterização do comportamento em corrosão da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais. A liga 2098-T351 foi caracterizada nas condições como recebida, atacada quimicamente, lixada e polida. A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. A resistência a corrosão foi avaliada por teste de imersão em $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl. Além disso, técnicas eletroquímicas como polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica local foram utilizadas para avaliação eletroquímica das superfícies estudadas em meios de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e $0,005 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl, respectivamente. Os resultados indicaram diferentes atividades eletroquímicas e diferentes mecanismos de propagação da corrosão dependendo do tipo de acabamento superficial. Atividades eletroquímicas maiores foram observadas para as condições como recebida e atacada quimicamente em comparação com as condições polidas e lixadas.

Palavras-chave: Liga de alumínio, acabamentos superficiais, caracterização microestrutural, corrosão.

ABSTRACT

The third generation of Al-Cu-Li alloys is applied in the aerospace industry due its microstructural characteristics and mechanical properties. However, additions of lithium, as an alloying element, favor the susceptible of these materials to localized corrosion. Therefore, methods to protect these alloys against corrosion are object of study worldwide. The 2098-T351 alloy is an Al-Cu-Li alloy of the 3th generation that was developed in order to replace conventional 2xxx series Al-Cu alloys in aircraft structure. Some studies are found in the literature related to the susceptibility to corrosion of this alloy. However, studies related to its protection are still scarce. Since the type of surface finishing is important for the adhesion and good performance of the subsequent protection layers, this work is a preliminary study on the characterization of the corrosion behavior of 2098-T351 alloy with different surfaces finishing. The 2098-T351 alloy was characterized in the as-received, etched, grounded and polished conditions. Microstructural characterization was performed by optical and scanning electron microscopy. Corrosion resistance was evaluated by immersion test in 0.1 mol L^{-1} of NaCl. Furthermore, electrochemical techniques such as potentiodynamic polarization and local electrochemical impedance spectroscopy were used to evaluate the electrochemical activity of the studied surfaces in 0.1 mol L^{-1} and 0.005 mol L^{-1} of NaCl, respectively. The results indicated different electrochemical activity and different corrosion propagation mechanisms depending on the surface finishing. Higher electrochemical activities were observed for as-received and etched conditions compared to polished and grounded ones.

Keywords: Al-Cu-Li Alloys, surface finishing, microstructural characterization, corrosion.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVO GERAL	17
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	18
3.1.1 Ligas de Al-Cu-Li	20
3.1.2 Tratamento Térmico	22
3.1.3 Microestrutura das ligas de Al-Cu-Li	24
3.2 CORROSÃO DAS LIGAS DE Al-Cu-Li.....	26
3.2.1 Corrosão por pites (Corrosão Localizada severa)	27
3.2.2 Corrosão intergranular e intragranular	29
3.2.3 Corrosão por esfoliação	31
3.3 ANODIZAÇÃO	32
3.3.1 Influencia da etapa de pré anodização nas características da camada anodizada	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 MATERIAIS.....	34
4.2 MÉTODOS.....	34
4.2.1 Acabamento Superficial	34
4.2.2 Microscopia óptica (MO)	36
4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	36

4.2.4 Perfilometria Óptica 3D (PO-3D)	37
4.2.5 Teste de Imersão	37
4.2.6 Polarização potenciodinâmica	37
4.2.7 Espectroscopia de impedância eletroquímica local (LEIS)	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA AA2098-T351	39
5.2 INVESTIGAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO E CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DA LIGA 2098-T351	47
5.2.1 Teste de Imersão	48
5.2.2 Caracterização eletroquímica	50
6. CONCLUSÕES	56
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFRÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio. Fonte: Matsumoto (2012).	18
Figura 2. Nomenclatura das ligas de alumínio para ligas trabalháveis e fundidas. Fonte: SCHEID, 2010.....	19
Figura 3. Diagrama de fases Al-Cu indicando as diferentes etapas do tratamento térmico de endurecimento. Fonte: Adaptado de VASUDEVAN, 2012.....	22
Figura 4. Diagrama esquemático das possíveis fases presentes nas ligas Al-Cu-Li e seus locais preferenciais de precipitação. Fonte: RIOJA, 2012.	26
Figura 5. Diagrama esquemático do mecanismo de propagação de pites nas ligas de alumínio. Fonte: Adaptado de Klodian et al 2019.....	28
Figura 6. Local de corrosão intragranular observado na liga 2098-T351 após polarização anódica Fonte: MILAGRE, 2019.	29
Figura 7. Microscopia eletrônica de varredura da liga 2024-T3 após corrosão indicando a presença de corrosão intergranular associada com a fase S. Fonte: DONATUS, 2017.....	30
Figura 8. Imagens da seção transversal da liga 2098-T351 (a e b) e 2024-T3 (c e d) após 48 h de exposição ao ensaio de esfoliação (ASTM G34). Fonte: MILAGRE, 2019.	31
Figura 9. Diagrama esquemático do processo de anodização do Al e estrutura da camada formada. Fonte: Adaptado de ALVES, 2012.....	32
Figura 10. Resumo dos métodos de caracterização e de avaliação da resistência à corrosão utilizados neste trabalho. Fonte: Autor.	34
Figura 11. Aspecto final da superfície das amostras após diferentes acabamentos superficiais utilizadas neste estudo. Fonte: Autor.	36

Figura 12. Imagem de microscopia ótica da liga 2098-T351. (a) Imagens de topo da superfície da liga após preparação metalográfica; (b) imagens da seção transversal da amostra após preparação metalográfica. As setas vermelhas indicam a direção de laminação. Ataque: 25% HNO ₃ e 3%HF. Fonte: Autor.....	39
Figura 13. Imagens da seção transversal da liga 2098-T351; (a) grãos grosseiros são observados próximos à superfície; (b) grãos mais finos são observados no bulk da liga. Fonte: Autor	40
Figura 14. Microscopia ótica da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais. (a) Amostra como recebida; (b) Amostra atacada quimicamente; (c) Amostra Lixada; (d) Amostra Polida. Fonte: Autor.	41
Figura 15. - Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais. (a) Amostra como recebida; (b) Amostra polida. Fonte: Autor.....	42
Figura 16. Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície da liga AA2098-T351 com seus respectivos mapas de EDS para os diferentes acabamentos superficiais analisados. Fonte : Autor.....	43
Figura 17. Composição química média da matriz da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais obtidas por análise pontual de EDS. Fonte: Autor.	44
Figura 18. Imagens de perfilometria ótica 3D da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais e perfis de profundidade das superfícies associados às linhas tracejadas. Fonte: Autor.....	46
Figura 19. Monitoramento da superfície da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais em solução 0,1 mol L ⁻¹ de NaCl por 24 h. Fonte: Autor. .	48
Figura 20. Curvas de polarização anódica obtidas para a liga 2098-T351 após imersão por 30 min em solução 0,1 mol L ⁻¹ de NaCl. Fonte: Autor.....	50
Figura 21. Mapas em 3D de admitância obtidos para liga 2098-T351 após 24 h de imersão em solução 0,005 mol L ⁻¹ de NaCl. Fonte : Autor.....	52

Figura 22. Imagem de microscopia eletrônica de varredura e respectivos mapas de EDS das superfícies da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos após 24 h de imersão em NaCl. Fonte: Autor.....53

Figura 23. Perfilometria ótica 3D das amostras após ensaio de LEIS por 24 horas em 0.005 mol L⁻¹ de NaCl. Fonte: Autor.....54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações das têmperas aplicadas as ligas de Al.....	23
Tabela 2. Precipitados presentes nas ligas de Al-Cu-Li e suas características.	25
Tabela 3. Representação dos quatro acabamentos superficiais avaliados neste trabalho.	35
Tabela 4. – Parâmetros de rugosidade obtidos por perfilometria ótica 3D obtidos para a liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais.....	47

LISTA DE ABREVIações

ASTM	American Society for Testing and Materials
CLS	Corrosão Localizada Severa
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
IGA	Corrosão Intragranular
LEIS	Espectroscopia de impedância eletroquímica local
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Ótica

1. INTRODUÇÃO

As ligas de Al-Cu-Li têm sido amplamente utilizadas na indústria aeroespacial, devido às suas propriedades como baixa densidade e elevada resistência mecânica. Estas características estão associadas com os aspectos microestruturais destes materiais e, são obtidas, pela adição de certos elementos de ligas (DONATUS, 2017).

A adição do lítio proporcionou uma melhora significativa das propriedades na terceira geração das ligas de Al-Cu-Li, como redução de peso sem alterações em sua resistência mecânica. Entretanto, a presença de partículas micrométricas compostas por Fe e Cu, comuns às ligas de alumínio, bem como a presença de precipitados nanométricos favorecem a susceptibilidade à corrosão localizada desses materiais (MILAGRE, 2019).

A corrosão da liga Al-Cu-Li, associada ao ataque da fase nanométrica T1 (Al-Cu-Li), é denominada corrosão localizada severa (CLS). Além disso, outros trabalhos relatam que as partículas constituintes micrométricas enriquecidas em Fe-Cu são responsáveis pela corrosão localizada conhecida como *trenching*, assim denominada pelo aspecto de valas que se formam pela corrosão da matriz ao redor dessas partículas (DONATUS et al, 2017; MA et al., 2015).

As ligas Al-Cu-Li exercem um importante papel na indústria aeroespacial, podendo ser aplicadas nas asas, estabilizadores horizontais, fuselagem e cabines de pressão das aeronaves. Portanto, como sua aplicação está relacionada à regiões críticas da aeronave, torna-se de extrema importância à análise do comportamento em corrosão desses materiais.

Processos para modificação do acabamento superficial dessas ligas são realizados antes da aplicação de camadas de proteção contra a corrosão. Os acabamentos superficiais melhoram a adesão das camadas de proteção contribuindo assim para a eficiência final do sistema de proteção (ASOH et al. 2001). Estes acabamentos

podem ser obtidos por procedimentos mecânicos como, por exemplo, utilização de abrasivos (discos, cintas de lixa folhas, com diversas variações granulométricas). Entretanto, este tipo de preparação mecânica não é considerado suficiente para garantir uma melhor resistência à corrosão, uma vez que a remoção de camada no pré-tratamento ocasionará uma tensão de tração na superfície do metal, reduzindo a resistência à fadiga e até mesmo favorecendo a corrosão (ZHANG, X et al. 2016).

A caracterização das superfícies segundo diferentes processos de acabamento e o modo como estes influenciam os processos posteriores para aumento da resistência à corrosão das ligas de Al-Cu-Li devem ser investigados. Embora trabalhos sobre a susceptibilidade à corrosão da liga 2098-T351 sejam encontrados na literatura (MILAGRE, 2018), trabalhos sobre a proteção deste material ainda são escassos.

Visando contribuir para o conhecimento sobre os parâmetros que afetam os processos para aumento da resistência à corrosão desta liga, neste trabalho a superfície da liga 2098-T351 foi caracterizada com diferentes acabamentos superficiais por técnicas de microscopia e, o seu comportamento em corrosão e atividade eletroquímica foram avaliados por testes de imersão e técnicas eletroquímicas em meios contendo cloreto.

2. OBJETIVO GERAL

Caracterizar e analisar a resistência à corrosão da liga Al-Cu-Li (2098-T351) após diferentes acabamentos superficiais.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar as superfícies antes e após os tratamentos superficiais por técnicas de microscopia ótica e eletrônica de varredura;

Caracterizar o comportamento em corrosão da liga com diferentes acabamentos superficiais por testes de imersão em solução contendo cloreto.

Determinar os mecanismos de corrosão associados com cada acabamento pela caracterização das superfícies corroídas por técnicas de microscopia ótica e eletrônica de varredura;

Caracterização da atividade eletroquímica das diferentes superfícies por técnicas eletroquímicas, convencional (polarização potenciodinâmica) e localizada (espectroscopia de impedância eletroquímica local), em meios contendo cloreto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio e suas ligas são de extrema importância e versatilidade com aplicação em diversos ramos industriais (NASCIMENTO, 2007}. A adição de elementos de liga a esses materiais melhoram suas propriedades mecânicas, uma vez que o alumínio puro é um material muito dúctil, e de aplicação limitada. Além disso, as propriedades dessas ligas podem ser melhoradas por tratamentos térmicos (SILVA, 2017).

Conforme os elementos de liga presente nas ligas de alumínio, estes materiais podem ser classificados em séries. A Figura 1 apresenta um resumo com as principais ligas comerciais de alumínio.

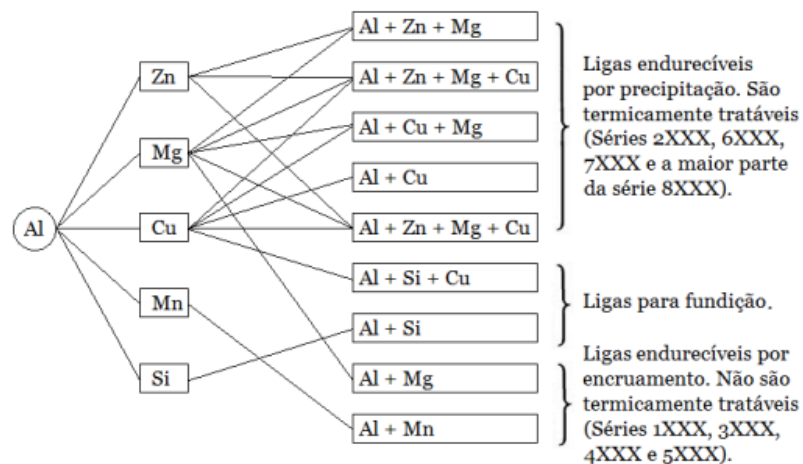


Figura 1. Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio. Fonte: Matsumoto (2012).

As ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos: ligas fundidas ou ligas trabalháveis ou forjadas. No primeiro caso, as ligas passam pela fundição e já adquirem as propriedades almejadas para sua aplicação. No segundo caso estes materiais serão submetidos a processos termomecânicos como: laminação, extrusão, forjamento e estiramento. No grupo das ligas trabalháveis as ligas tratáveis passam por um tratamento térmico e com isso suas propriedades e características desejáveis para aplicação são alcançadas. Já as ligas trabalháveis não tratáveis

adquirem suas características e propriedades mecânicas por trabalho a frio, ou seja, encruamento (POLMEAR, 1996).

A nomenclatura das ligas de alumínio segue um padrão conforme descrito a seguir. Para as ligas que são trabalháveis (tratáveis) é empregado um padrão XXXX, e para as ligas fundidas XXX.X. O primeiro X indica o principal elemento de liga. O segundo e o terceiro algarismos representam a composição específica. Na Figura 2, um breve resumo sobre a nomenclatura das ligas é apresentado.

NOMENCLATURA ALUMINUM ASSOCIATION (AA) e ASTM PARA LIGAS TRABALHADAS		NOMENCLATURA ALLUMINUM ASSOCIATION (AA) e ASTM PARA LIGAS FUNDIDAS	
Alumínio > 99% de pureza	→ 1XXX	Alumínio > 99% de pureza	→ 1XX.X
Cobre	→ 2XXX	Cobre	→ 2XX.X
Manganês	→ 3XXX	Silício e Cobre e/ou Magnésio	→ 3XX.X
Silício	→ 4XXX	Silício	→ 4XX.X
Magnésio	→ 5XXX	Magnésio	→ 5XX.X
Magnésio e Silício	→ 6XXX	Zinco	→ 7XX.X
Zinco	→ 7XXX	Estanho	→ 8XX.X
Outros elementos	→ 8XXX	Outros Elementos	→ 9XX.X

Figura 2. Nomenclatura das ligas de alumínio para ligas trabalháveis e fundidas. Fonte: SCHEID, 2010.

A adição de elementos de liga tem como propósito refinar ou estabilizar a microestrutura desses materiais, a fim de se conseguir as propriedades desejadas. A seguir, são apresentadas as principais séries das ligas de alumínio trabalháveis e o efeito dos elementos de liga sobre estes materiais:

1XXX - Alumínio comercialmente puro. Essa série apresenta diferentes graus de pureza que vão desde 99% até 99,99%, sua aplicação é direcionada a indústrias químicas e elétricas devido às menores propriedades mecânicas e maior condutividade.

2XXX – Ligas de Al-Cu. Sua elevada resistência mecânica está relacionada à adição de Cu. Tratamentos térmicos favorecem a resistência térmica, usinabilidade e boa

tenacidade desses materiais. Esta série é amplamente aplicada na indústria aeronáutica.

3XXX – Ligas Al-Mn. A adição de Mn melhora a resistência à corrosão e, juntamente com outros metais de adição, a conformabilidade. Devido às suas propriedades são aplicadas em estruturas arquitetônicas.

4XXX – Ligas Al-Si. Ligas de baixo teor de Si são aplicáveis em utensílios domésticos. Já as de alto teor são aplicáveis em trocadores de calor.

5XXX - Ligas Al-Mg. Apresentam alta resistência à corrosão, soldabilidade e conformabilidade. Aplicáveis em atmosferas marinhas.

6XXX – Ligas Al-Mg-Si. Apresentam propriedades como: conformabilidade a frio e soldabilidade. São empregadas principalmente na fabricação de produtos extrudados.

7XXX – Ligas Al-Zn. As ligas desta série possuem elevada resistência mecânica, podendo conter ou não adições de Cu. São aplicadas em componentes de estrutura de aeronaves e em moldes para conformação de termoplásticos.

8XXX – Ligas com a adição de Sn, Fe, Si, Li e Mg. Essas ligas apresentam bom limite de resistência mecânica e boa isotropia devido à sua microestrutura de grãos refinados (ASM SPECIAL HANDBOOK,1993).

3.1.1 Ligas de Al-Cu-Li

Essas ligas possuem Cu e Li como elementos principais. Portanto, são ligas da série 2XXX com aplicação voltada à indústria aeronáutica. A principal motivação para o desenvolvimento tecnológico dessas ligas foi a redução do peso das estruturas das aeronaves, já que o lítio reduz a densidade específica desses materiais. A densidade da liga é reduzida em aproximadamente 3%, quando o Li é adicionado; além disso, sua presença aumenta o módulo de elasticidade desses materiais em 6% (LAVERNIA, GRANT,1987).

Os primeiros registros de utilização desse material remontam a primeira guerra mundial, onde o desenvolvimento das ligas de alumínio despontou (GRANT, 2017). Neste período, materiais leves e com alta resistência eram requeridos para a

aplicação imediata em aeronaves. As primeiras gerações destas ligas não mostraram desempenho satisfatório, pois não suportavam a exposição às altas temperaturas, baixa ductilidade, tenacidade à fratura e escoamento. Além disso, por ser muito reativo, quando adicionado ao alumínio, o Li reduz a temperatura de fusão. Essas ligas eram baseadas no sistema Al-Zn-Cu-Li e Al-Cu-Li-Cd (MILAN, et al, 2004).

A segunda geração das ligas de Al contendo Li surgiram na década de 70, essa classe apresentava teores de Li acima de 2%. Entretanto, apresentavam um grau de anisotropia, com prejuízos para a tenacidade à fratura (LIN et al, 1982).

Visando corrigir a baixa tenacidade à fratura, a terceira geração foi desenvolvida com menores teores de Li e Cu. Com isto, as ligas apresentaram: maiores limites de resistência e maiores alongamento, baixa densidade, redução no peso, melhor resistência à propagação de trincas e à corrosão. (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1993).

O endurecimento por precipitação, bem como o envelhecimento são processos para aumento da resistência mecânica, amplamente empregados em ligas de alumínio. Para que estes processos ocorram, os elementos de liga presentes devem ter baixa solubilidade no alumínio na medida em que a temperatura de solução sólida diminui. Essa relação é ilustrada na Figura 3. Na etapa de solubilização o material é aquecido até que sua estrutura seja somente fase α , o que acarretará numa dissolução de segundas fases. Na sequência, o material é submetido a um resfriamento rápido para que a matriz α fique supersaturada. Por fim, no envelhecimento o material será aquecido novamente até que a precipitação de segundas fases ocorra de maneira dispersa. (MILAN et al, 2004).

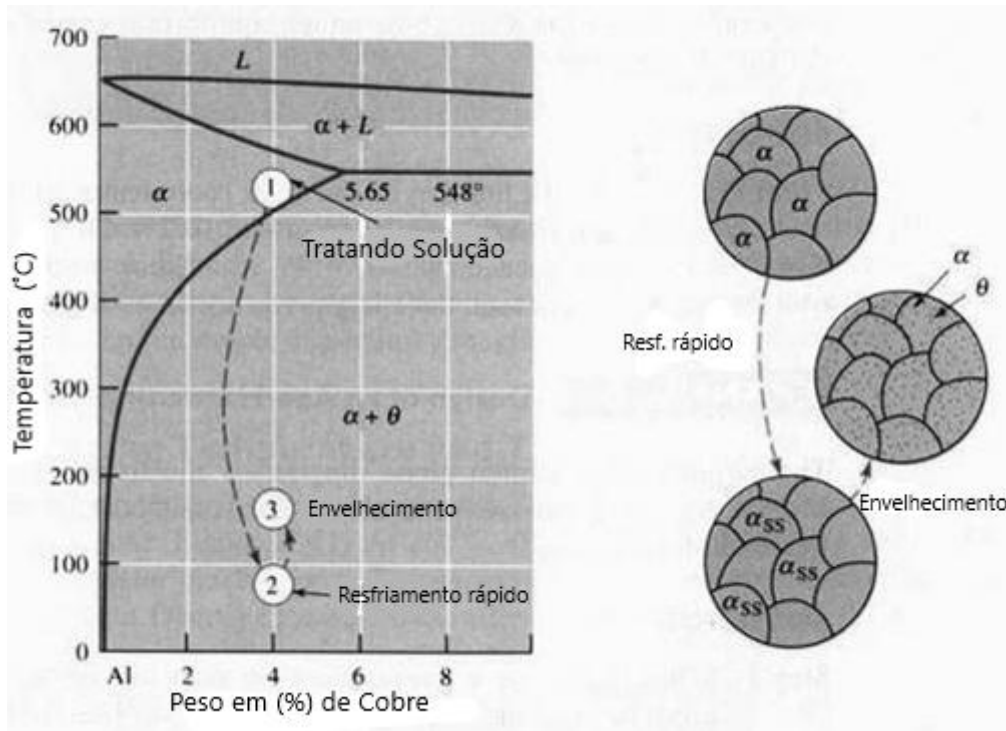


Figura 3. Diagrama de fases Al-Cu indicando as diferentes etapas do tratamento térmico de endurecimento. Fonte: Adaptado de VASUDEVAN, 2012.

3.1.2 Tratamento térmico

Em materiais não ferrosos os tratamentos térmicos dos materiais são, em geral, diferentes, quando comparados aos aplicados em aços e ferro fundido (MACHADO, 2002). Os principais tratamentos são:

- Envelhecimento por precipitação: este tratamento tem o objetivo formar precipitados coerentes/ incoerentes com a matriz os quais melhoram suas propriedades mecânicas.
- Homogeneização: normalmente é aplicado em peças fundidas, com tempos de duração bem longos, quando comparados com os outros tratamentos. Seu principal objetivo é a homogeneização da composição química do material.
- Reozimento: o objetivo deste tratamento é a diminuição da dureza do material pela redução do seu grau de encruamento.

- Solubilização: sendo o oposto do envelhecimento, este tratamento visa eliminar os precipitados, retornando-os para solução sólida pelo aumento da temperatura.

Os tratamentos térmicos aos quais as ligas de alumínio são submetidas favorecem modificações microestruturais que influenciarão em suas propriedades mecânicas finais. Como já mencionado, são referenciados na nomenclatura das ligas, por letras seguidas de números. Na Tabela 1, os principais tipos de tratamentos de envelhecimento aplicados às ligas de Al são apresentados.

Tabela 1. Especificações das têmperas aplicadas as ligas de Al.

Tipo	Especificação dos primeiros dígitos
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural.
T2	Recozimento.
T3	Solubilização total e deformação a frio.
T4	Solubilização total e envelhecimento natural.
T5	Apenas envelhecimento artificial.
T51	Alívio de tensões pelo alongamento.
T6	Solubilização total e envelhecimento artificial.
T7	Solubilização e estabilização.
T8	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial.
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio.

Fonte: NASCIMENTO, 2007

O tratamento dessas ligas inicia-se pela solubilização que consiste em um aquecimento próximo ao ponto de fusão da liga, por determinado período de tempo para garantir que os átomos desses elementos, formadores dos precipitados, se difundam na matriz e permaneçam em solução sólida (DA SILVA, 2021). No envelhecimento, intercaladamente, após ou anteriormente ao aquecimento (em temperaturas mais baixas que a temperatura de solubilização), realiza-se uma etapa de deformação plástica. Os tratamentos T3 e T8 são os mais comumente aplicados

em ligas Al-Cu-Li. Essas práticas visam o endurecimento por precipitação de segundas fases cuja quantidade aumenta muito com a deformação, devido ao aumento da densidade de discordâncias que são locais preferenciais para a nucleação desses precipitados. (PISSINATTI, 2019).

Para o alumínio os tratamentos térmicos são identificados na nomenclatura das ligas por uma letra seguida ou não de um número. Por exemplo, para a liga 2098-T351, o “T” indica que a liga é do tipo trabalhável e termicamente tratada. A sequência de números após a letra, “T351”, indicam que a liga sofreu envelhecimento natural (“3”) seguido de estiramento (“51”). Esta sequência de tratamentos visa o aumento da precipitação de segundas fases endurecedoras, o que contribui para o aumento da resistência mecânica da liga (POLMEAR, 1995).

3.1.3 Microestrutura das ligas de Al-Cu-Li

Como mencionado, o Cu é o principal elemento de liga da série 2XXX. Sua solubilidade máxima no Al é de cerca de 5,6% à 548°C. Já a solubilidade do Li é de no máximo 5,2% (MENEZES et al, 2019). Portanto, dependendo do histórico termomecânico ao qual o material foi submetido, as fases descritas na Tabela 2, podem estar presentes na microestrutura desses materiais.

Tabela 2. Precipitados presentes nas ligas de Al-Cu-Li e suas características.

Fase	Estrutura	Estequiometria	Plano atômico	Características	Função
θ	Tetragonal	Al_2Cu	{100}	Precipitados ao longo da nucleação do plano {111} das discordâncias	-
θ'	Tetragonal	Al_2Cu	{100}		Endurecimento
θ''	Tetragonal	Al_2Cu	{100}		Endurecimento
δ	Cúbica	$AlLi$	{011}	Formato de Placas nos contornos dos grãos	-
δ'	Cúbica	Al_3Li	{011}	Precipitados esféricos	Endurecimento
T_1	Hexagonal	Al_2CuLi	{111}	Placas com formato fino	Endurecimento, controle de dureza
T_2	Isosaedra	Al_5LiCu	{111}	Ao longo dos contornos de grãos, após altas temperaturas por envelhecimento	Controle de dureza

Fonte: ARAUJO, 2019

A composição química característica da liga de Al-Cu-Li 2090, por exemplo, é da ordem de 2,2% em peso de Li e 2,7% em peso de Cu. Estas adições aliadas aos processos termomecânicos conferem a esta liga uma microestrutura caracterizada pela precipitação de segundas fases como a T2 e T1 (VASUDEVAN, 2012).

Como observado na Tabela 2, os precipitados apresentam diferenças de composição química que irão influenciar a sua estrutura cristalina. Além disso, podem precipitar-se preferencialmente em discordâncias no interior dos grãos ou em

seus contornos. A Figura 4 apresenta um diagrama esquemático das fases presentes nas ligas Al-Cu-Li bem como os seus locais preferenciais de precipitação.

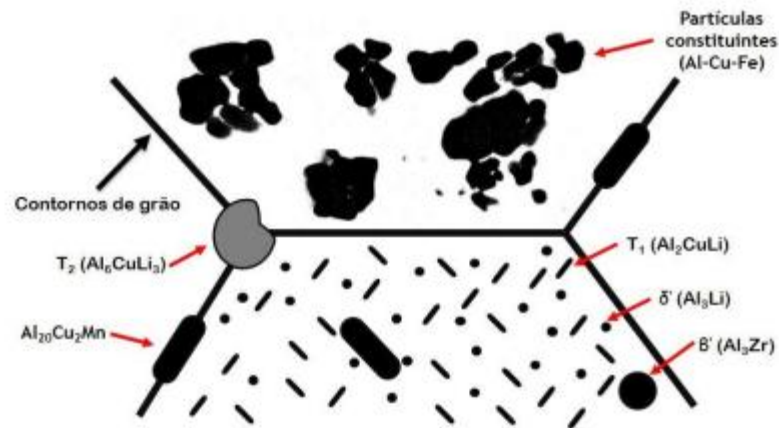


Figura 4. Diagrama esquemático das possíveis fases presentes nas ligas Al-Cu-Li e seus locais preferenciais de precipitação. Fonte: RIOJA, 2012.

A liga 2098-T351, utilizada neste trabalho, foi desenvolvida para ser substituta das ligas 2024 e 2219, sua aplicação é voltada para indústria aeroespacial e apresenta uma boa soldabilidade, resistência mecânica obtidas pela adição de elementos de liga como Cu, Li, Mg, Ag, Zr (DA SILVA, 2019).

As características microestruturais desta liga são apresentadas por Milagre (2019). Segundo a autora, a liga é constituída de uma microestrutura de grãos alongados na direção de laminação, devido ao processo de conformação, com fases como δ, θ e T1 essa contendo até 4 variantes e partículas micrométricas compostas por Al-Fe-Cu .

3.2 CORROSÃO DAS LIGAS DE Al-Cu-LI

O processo de corrosão dos metais caracteriza-se por reações espontâneas químicas e eletroquímicas na superfície. Estruturas metálicas estão presentes nos mais diversos ramos da atividade humana, portanto o estudo da corrosão e o desenvolvimento de métodos de proteção são de extrema importância para garantir

o desempenho em serviço dessas estruturas metálicas, bem como reduzir custos com manutenções (TAYLOR, 2015).

As ligas de Al-Cu-Li são susceptíveis à corrosão localizada intragranular ou intergranular e exfoliação (MA et al. 2015; GUILLAUMIN et al,1999; KEDDAM, M et al,1997).No caso das ligas de Al-Cu-Li, o processo de corrosão está associado com a presença de partículas micrométricas ricas em Fe-Cu e com a fase nanométrica T1 (MACHADO et al, 2019; DONATUS et al, 2017; MILAGRE et al 2019) A seguir, uma breve descrição dos principais tipos de corrosão observados nas ligas Al-Cu-Li é apresentada.

3.2.1 Corrosão por pites (Corrosão localizada severa)

A corrosão por pites ocorre em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, devido à diferença de potencial eletroquímico entre a matriz e segundas fases, defeitos ou variações microestruturais presentes nas ligas, quando o material é submetido a um ambiente agressivo. Esta diferença de potencial produz um ataque localizado (pite) que pode penetrar no interior do metal no sentido de sua espessura. Em geral, este tipo de ataque é caracterizado por possuir uma profundidade maior que seu diâmetro (DAVIS, 1999).

As ligas de alumínio, em geral, apresentam um óxido natural, passivador, que se forma sobre a superfície desses materiais, quando estes são expostos ao ar. Portanto, a formação do pite está diretamente ligada à presença de ataque localizado por ânions agressivos como Cl^- , devido à presença de segundas fases, por exemplo. Assim, quando a superfície do material é exposta a um ambiente agressivo que contenha íons cloreto, por exemplo, essas regiões de defeitos serão regiões preferenciais para o início do ataque localizado. Além da concentração de íons, o ataque também é influenciado pela temperatura, pH e até mesmo fluxo da solução agressiva (SZKLARSKA, 1998; ABREU et al., 2012).

Como já mencionado, as segundas fases presentes nas ligas de Al favorecem a corrosão por pites. Este processo se inicia nestas áreas ou em áreas adjacentes (matriz), dependendo da diferença de potencial eletroquímico estabelecido. Por exemplo, quando as partículas apresentam um potencial eletroquímico menor que a matriz (ânodo), estas sofrem corrosão, pela dissolução preferencial do elemento de liga de menor potencial contido nestas fases. Já, quando as partículas possuem um potencial eletroquímico maior que a matriz (cátodo) ocorre a dissolução preferencial da matriz no entorno dessas partículas. (SERDECHNOVA, et al. 2014). A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático do processo de corrosão por pites.

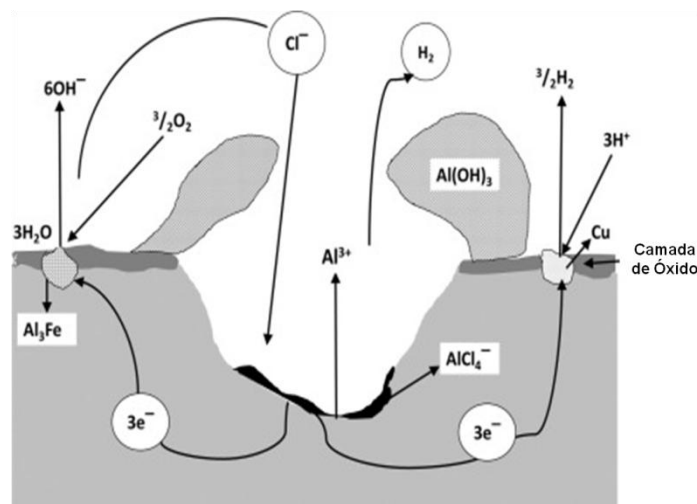


Figura 5. Diagrama esquemático do mecanismo de propagação de pites nas ligas de alumínio. Fonte: Adaptado de Klodian et al 2019.

No caso das ligas Al-Cu-Li, pites com características específicas são denominados como corrosão localizada severa (CLS). Este tipo de pite está relacionado com a dissolução preferencial da fase T1 (Al₂CuLi), Segundo (LI et al 2005) a fase T1 apresenta um comportamento inicialmente anódico em relação à matriz. Com a dissolução preferencial do Li, presente nesta fase, uma inversão de potencial ocorre, pelo enriquecimento em Cu da fase remanescente que passa a atuar como catodo. Como resultado, tem-se a corrosão da matriz na região adjacente. Segundo (MA et al 2015) a CLS é caracterizada pela evolução de hidrogênio nas regiões anódicas e o pite é cercado por uma área protegida catódicamente, onde ocorrem as reações de redução.

3.2.2 Corrosão intergranular e intragranular

O mecanismo de propagação por pites pode ocorrer de maneira intergranular ou intragranular. Na corrosão intragranular o ataque inicia-se e propaga-se dentro dos grãos. Segundo Milagre (2019) a liga 2098-T351, Figura 6, é susceptível à corrosão intragranular.

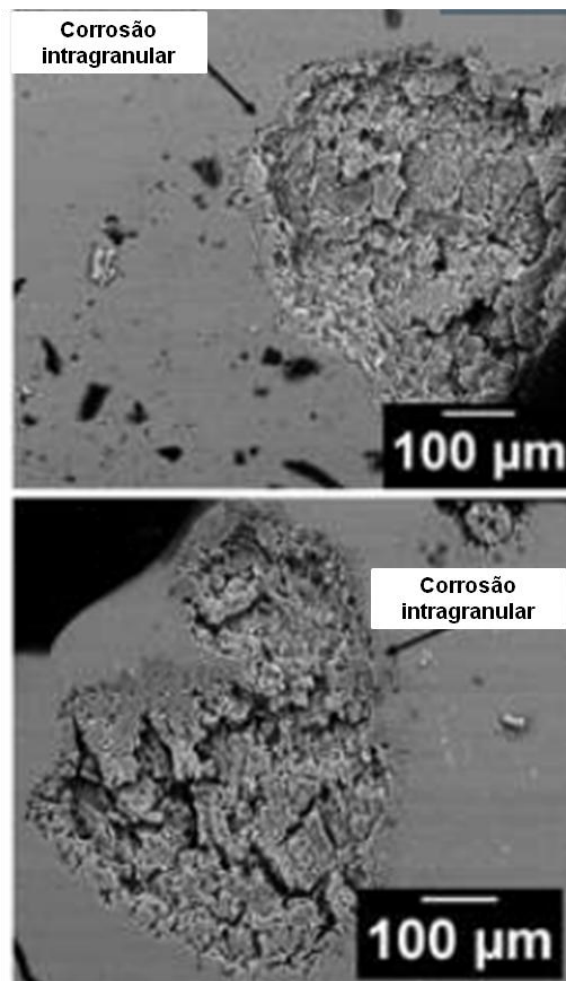


Figura 6. Local de corrosão intragranular observado na liga 2098-T351 após polarização anódica
Fonte: MILAGRE, 2019.

A corrosão intergranular é comumente encontrada nas ligas de Al, esta consiste em um ataque que ocorre na região dos contornos dos grãos, devido à presença de segundas fases ou segregações de elementos de liga nestes locais. Portanto, uma

diferença de potencial é estabelecida entre os contornos e o interior do grão. Sendo o contorno mais anódico que o interior do grão, a corrosão ocorrerá preferencialmente nestes locais (MARTENDAL, 2016). Na Figura 7, observam-se regiões de corrosão intergranular em uma liga de alumínio da série 2XXX, 2024-T3.

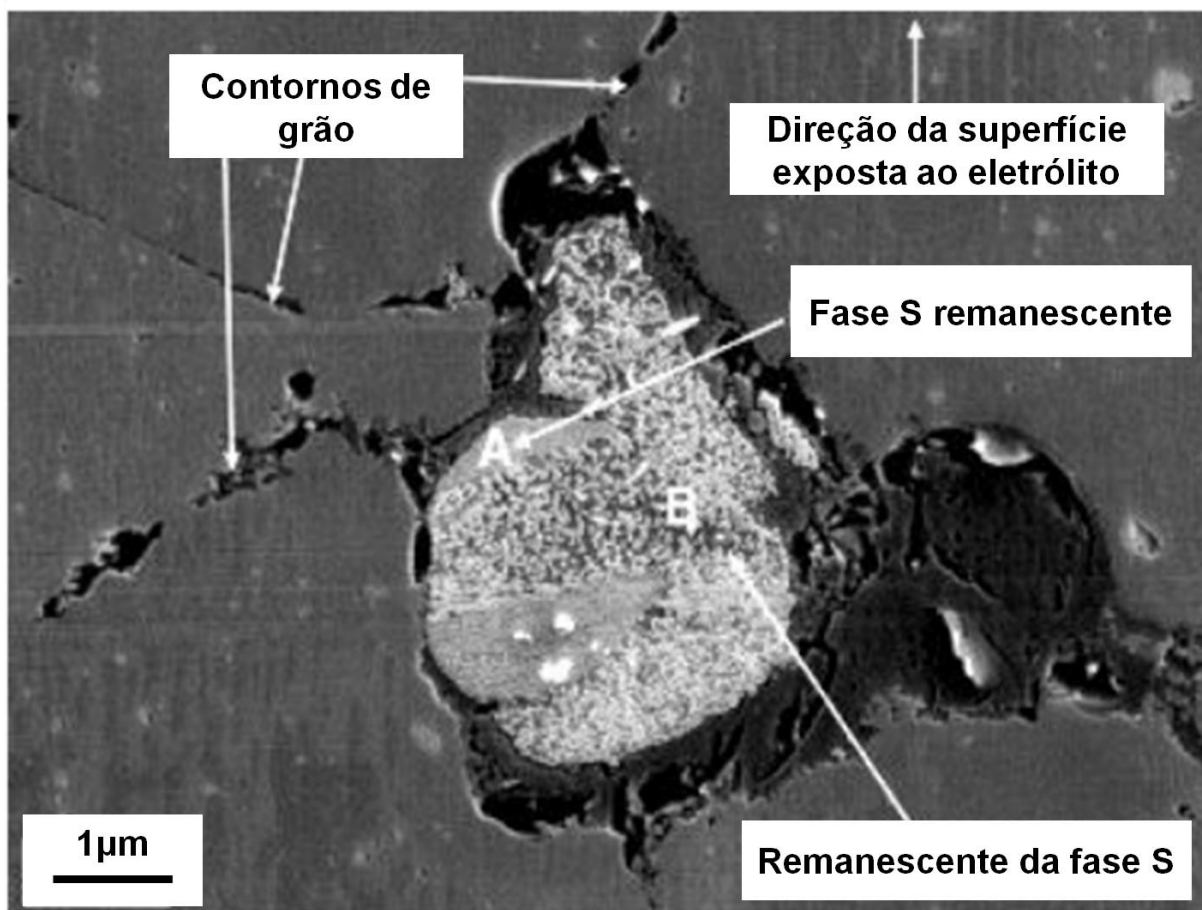


Figura 7. Microscopia eletrônica de varredura da liga 2024-T3 após corrosão indicando a presença de corrosão intergranular associada com a fase S. Fonte: DONATUS, 2017.

Nas ligas de Al-Cu-Li, o mecanismo de propagação da corrosão intergranular pode estar associado à: (1) precipitação de segundas fases anódicas nos contornos de grão, (2) regiões adjacentes livres de precipitados e; (3) regiões deficientes em Cu, em solução sólida, decorrente da precipitação dos intermetálicos enriquecidos neste elemento. Como consequência tem-se o estabelecimento de uma diferença de potencial entre as regiões anódicas do contorno de grão e as regiões catódicas adjacentes (DESCHAMPS, 2012).

Segundo Machado et al (2016), a corrosão intergranular é associada com a presença de fase T1 na microestrutura das ligas de Al-Cu-Li. O mecanismo de corrosão associado com a fase T1, envolve a formação de pares galvânicos com a zona livre de precipitados. No início esta fase é anódica em relação à matriz devido à presença do Li. Com o prosseguimento do processo de corrosão a fase remanescente é enriquecida em Cu. Segundo Araujo (2019), a suscetibilidade da liga à corrosão intergranular pode aumentar dependendo do tipo de tratamento termomecânico ao qual esta é submetida.

3.2.3. Corrosão por esfoliação

A corrosão por esfoliação é citada na literatura como um tipo de corrosão intergranular que se propaga paralelamente a superfície metálica. Ocorre preferencialmente em materiais que apresentam grãos alongados. O ataque inicia-se conforme discutido anteriormente. Entretanto, o volume de produtos gerado devido à severidade do ataque favorece a abertura das regiões corroídas, conforme observado na Figura 8.

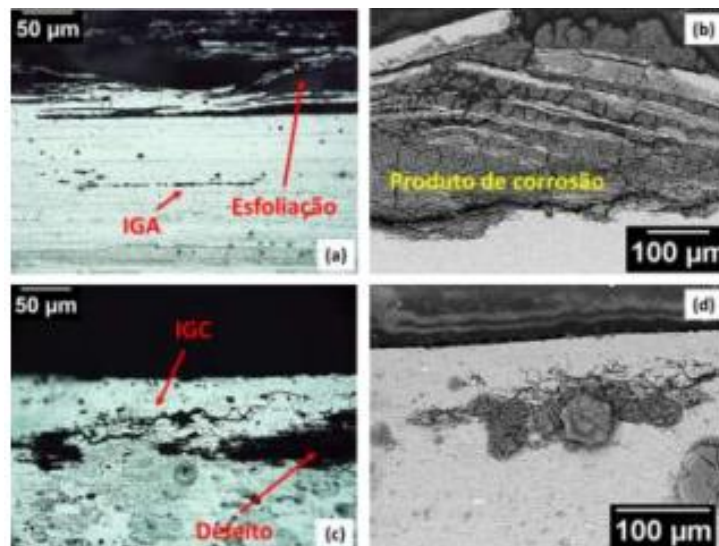


Figura 8. Imagens da seção transversal da liga 2098-T351 (a e b) e 2024-T3 (c e d) após 48 h de exposição ao ensaio de esfoliação (ASTM G34). Fonte: MILAGRE, 2019.

Conforme observado por Milagre (2019), a liga 2098-T351 é susceptível a corrosão por esfoliação. Entretanto, foi observado que o produto de corrosão gerado pelo ataque no interior dos grãos foi o responsável por exercer pressão entre os grãos ocasionando a esfoliação. Portanto, no caso da liga 2098-T351 a esfoliação mostrou-se estar associada à corrosão intragranular.

3.3 ANODIZAÇÃO

A fim de promover a proteção contra a corrosão e melhorar a estética das superfícies das ligas de alumínio, o processo de anodização, como tratamento de superfície, é aplicado às ligas de Al (RUNGE, 2008). Segundo Runge (2008) o processo consiste em favorecer a formação de um filme de óxido por aplicação de corrente ou potencial, por meio de processos eletroquímicos. Durante o processo são geradas duas camadas, uma camada barreira, mais resistente, e uma camada de óxidos grosseira e caracterizada pela presença de poros ordenados, portanto denominada camada porosa. A combinação das duas camadas é conhecida como camada anodizada (CA), como mostrado na Figura 9.

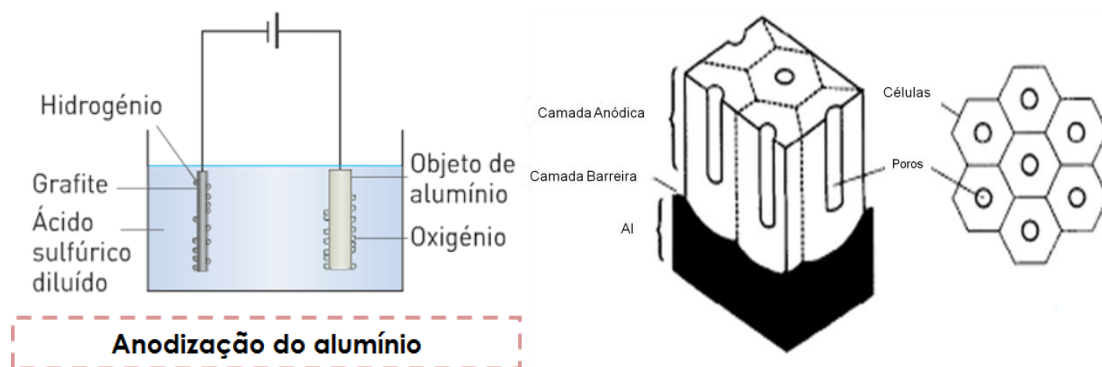


Figura 9. Diagrama esquemático do processo de anodização do Al e estrutura da camada formada.

Fonte: Adaptado de ALVES, 2012.

3.3.1 Influencia da etapa de pré anodização nas características da camada anodizada

Anterior à etapa de anodização, pré-tratamentos superficiais devem ser realizados na superfície desses materiais. Esta etapa é importante, pois influencia diretamente o crescimento da camada da anodizada e o processo de selagem (LIU, 2015).

Um estudo realizado por Dimogerontakis et al (1998), mostrou a influência de diferentes superfícies nas propriedades da liga 2024-T3, depois de submetê-la a diferentes tratamentos de pré anodização. De acordo com os autores a amostra polida quimicamente, mostrou melhores resultados, apresentando maior aderência na anodização.

Estudos têm apontado que a pré-anodização influencia diretamente no processo de corrosão e que, portanto, faz-se necessário o uso desta etapa para proteção nas ligas de alumínio (CAPELOSSI et al. 2014). Entretanto, informações sobre anodização e pré tratamentos da liga 2098-T351 são escassos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

A composição química da liga 2098-T351 obtida por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado (ICP-OES) foi de: 3,4% em massa de Cu, 1% em massa de Li, 0,3% em massa de Mg, 0,3% em massa de Ag, 0,4% em massa de Zr, 0,04% em massa de Fe, 0,05% em massa de Si, 0,02% em massa de Zn, 0,003% em massa de Mn. O material foi obtido na forma de chapas com espessura de 3 mm. Além disso, a liga foi obtida segundo a tempera “T351” que corresponde às etapas de: (1) solubilização; (2) alívio de tensões por estiramento e; (3) envelhecimento natural.

4.2 MÉTODOS

A Figura 10 apresenta um breve resumo dos métodos utilizados neste estudo.

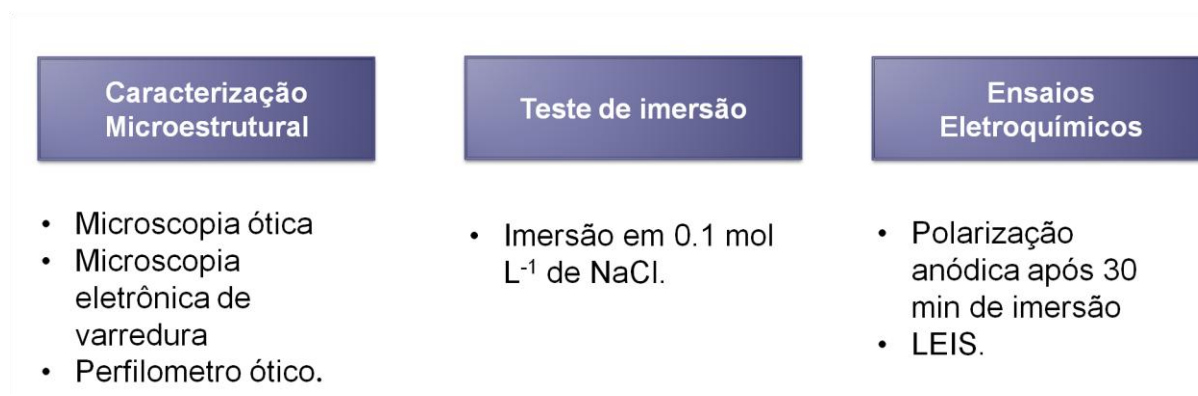


Figura 10. Resumo dos métodos de caracterização e de avaliação da resistência à corrosão utilizados neste trabalho. Fonte: Autor.

4.2.1 Acabamento superficial

A preparação das amostras ocorreu segundo as técnicas metalográficas, além de um ataque químico. Na Tabela 5 são descritas as etapas de preparação das superfícies avaliadas neste trabalho.

Tabela 3. Representação dos quatro acabamentos superficiais avaliados neste trabalho.

Acabamento	Procedimento
Como recebida pelo fabricante	(1) Desengraxe com acetona em banho ultrassônico por 10 min; (2) Lavagem em água deionizada; (3) Secagem com fonte de ar quente.
Ataque químico	(1) Desengraxe com acetona em banho ultrassônico por 10 min; (2) Lavagem em água deionizada; (3) Decapagem com solução de NaOH 40% a 40 °C por 30 s; (4) Lavagem em água deionizada por 3 min; (5) Neutralização em ácido comercial Turco® smuttgo por 15 s; (6) Lavagem em água deionizada por 3 min; (7) Secagem com fonte de ar quente.
Amostra Lixada	(1) Lixamento mecânico com papel de SiC na seguinte sequência: # 320, # 500, # 800, # 1200, # 2500, # 4000; (2) Lavagem em água deionizada; (4) Secagem com fonte de ar quente.
Amostra Polida	(1) Lixamento mecânico com papel SiC na seguinte sequência: # 320, # 500, # 800, # 1200, # 2500, # 4000; (2) Polimento com suspensão de diamante de 3 e 1 µm (3) Lavagem em água deionizada; (4) Secagem com fonte de ar quente.

Fonte: Autor.

A Figura 11 apresenta o aspecto final das superfícies analisadas neste trabalho.

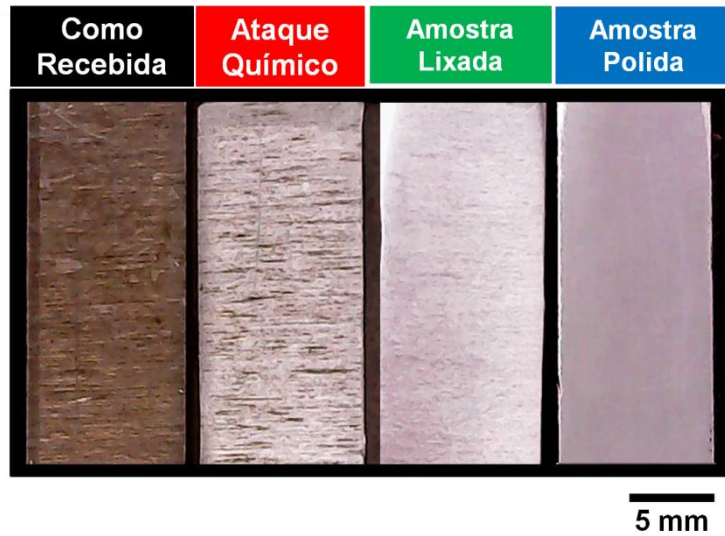


Figura 11. Aspecto final da superfície das amostras após diferentes acabamentos superficiais utilizadas neste estudo. Fonte: Autor.

4.2.2 Microscopia óptica (MO)

Para a realização das imagens de MO foi utilizada uma câmera LEICA DMLM acoplada a microscópio ótico pertencente ao Laboratório de Eletroquímica e Revestimentos Protetores (LabERP) do Centro de Caracterização e Tecnologia de Materiais (CECTM). As imagens foram obtidas antes e após os ensaios de corrosão.

4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a realização das imagens de MEV foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura de bancada Hitachi modelo TM3000 pertencente ao CCTM/IPEN e Centro de Laser e Aplicações (CLA/IPEN) acoplado com o sistema de energia dispersiva de raios-X (Quanta EDS). As imagens foram obtidas antes e após os ensaios de corrosão.

4.2.4 Perfilometria Óptica 3D (PO-3D)

Imagens em 3D e perfis em linha de profundidade da superfície da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais foram obtidas utilizando o perfilômetro óptico ZYGO's ZeGage™ pertencente ao CLA/IPEN.

4.2.5 Teste de imersão

Os ensaios de imersão foram realizados em solução de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl naturalmente aerada a temperatura ambiente ($22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) com as amostras sendo removidas da solução após 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 12 h e 24 h, enxaguadas com água deionizada e secas para, em seguida, serem observadas por microscopia ótica.

4.2.6 Polarização potenciodinâmica

Os ensaios de polarização potenciodinâmica foram realizados utilizando potenciostato AUTOLAB PGSTAT pertencente ao LabERP (CCTM/IPEN) controlado pelo software NOVA 2.2.3. Os experimentos foram realizados em solução de NaCl $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, à temperatura ambiente ($22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$). A célula eletroquímica era também composta de um eletrodo de referencia de Ag/AgCl/KCl_{3.5M} e um contra eletrodo de platina. A área exposta ao meio de ensaio foi de $0,09 \text{ cm}^2$ sendo esta delimitada por cera de abelha. As curvas de polarização anódicas foram obtidas a partir do OCP até $1,0 \text{ V vs Ag/AgCl/KCl}_{3.5\text{M}}$ com taxa de varredura de $0,001 \text{ V s}^{-1}$ e *cutoff* de corrente de $0,001 \text{ A}$.

4.2.7 Espectroscopia de impedância eletroquímica local (LEIS)

Os ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica local (*local electrochemical impedance spectroscopy* - LEIS) foram realizados usando um sistema Ametek® VS-LEIS, controlado pelo software VerScan®. A área avaliada foi de $0,25 \text{ cm}^2$ e os mapas foram obtidos na frequência de 5 Hz com amplitude de

0,020 V passes de 200 μm e uma altura de 300 μm da superfície da amostra. Os experimentos foram realizados em solução de NaCl 0,005 mol L⁻¹, à temperatura ambiente (22 \pm 2 °C). Um eletrodo Ag/AgCl foi usado como referência e um anel de Pt foi usado como um contra-eletrodo. Os mapas de admitância das amostras foram obtidos após 24 h de exposição das superfícies à solução.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA 2098-T351

Neste tópico, a caracterização superficial da liga 2098-T351 com os diferentes acabamentos superficiais será discutida.

Como mencionado anteriormente, a liga 2098-T351 foi adquirida na forma de chapas. A Figura 12 apresenta imagens obtidas por microscopia ótica da liga 2098-T351 após polimento e ataque metalográfico. É possível observar na Figura 11(a) uma estrutura de grãos alongados na direção de laminação, conforme indicado pelas setas. Já na Figura 11(b) uma imagem da seção transversal da amostra indica uma estrutura de grãos grosseiros próximos à superfície.

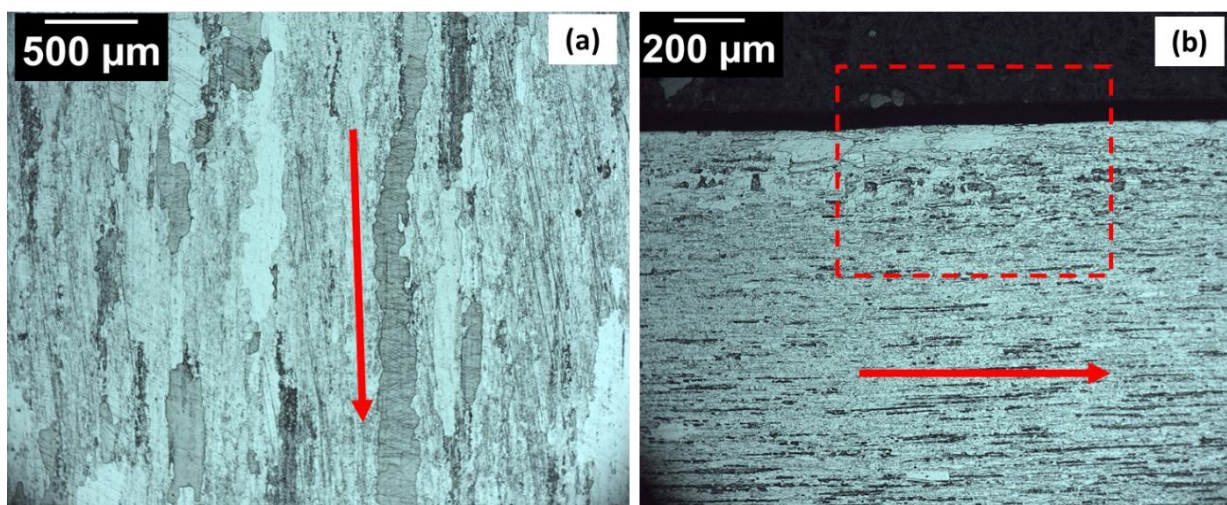


Figura 12. Imagem de microscopia ótica da liga 2098-T351. (a) Imagens de topo da superfície da liga após preparação metalográfica; (b) imagens da seção transversal da amostra após preparação metalográfica. As setas vermelhas indicam a direção de laminação. Ataque: 25% HNO₃ e 3%HF.

Fonte: Autor.

A Figura 13 apresenta uma ampliação da seção transversal da região da superfície e volume do material. Uma camada de grãos refinados é observada na região próxima à superfície em relação ao volume. Esta diferença de morfologia dos grãos ao longo

da espessura está relacionada ao processo de laminação das chapas cujos esforços mecânicos e temperaturas atingidas favorecem o processo de recristalização dinâmica do material nas regiões próximas a superfície (HUNTER et al., 2013).

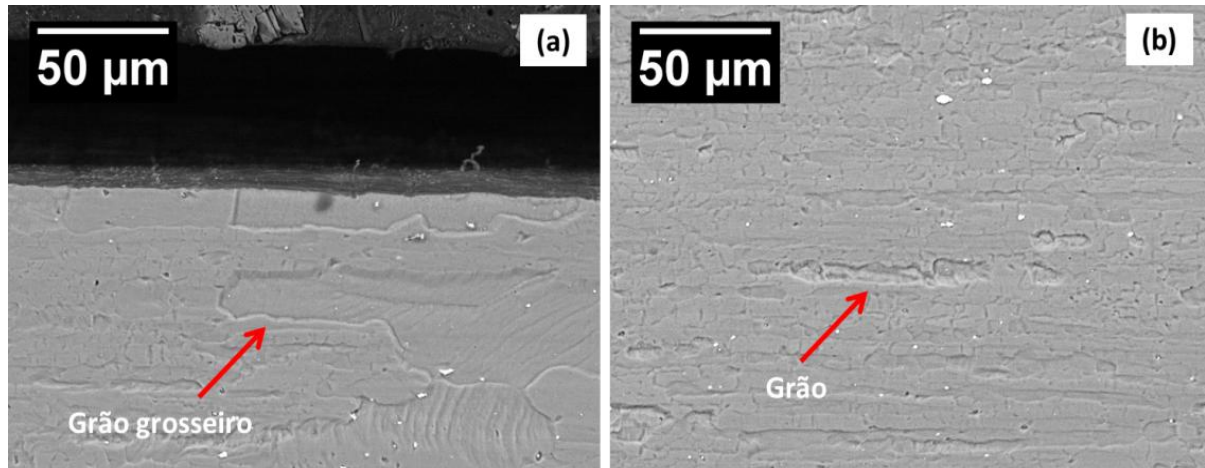


Figura 13. Imagens da seção transversal da liga 2098-T351; (a) grãos grosseiros são observados próximos à superfície; (b) grãos mais finos são observados no bulk da liga. Fonte: Autor

Imagens de microscopia ótica da superfície da liga 2098-T351 com os diferentes acabamentos superficiais caracterizados neste trabalho são mostrados na Figura 14.

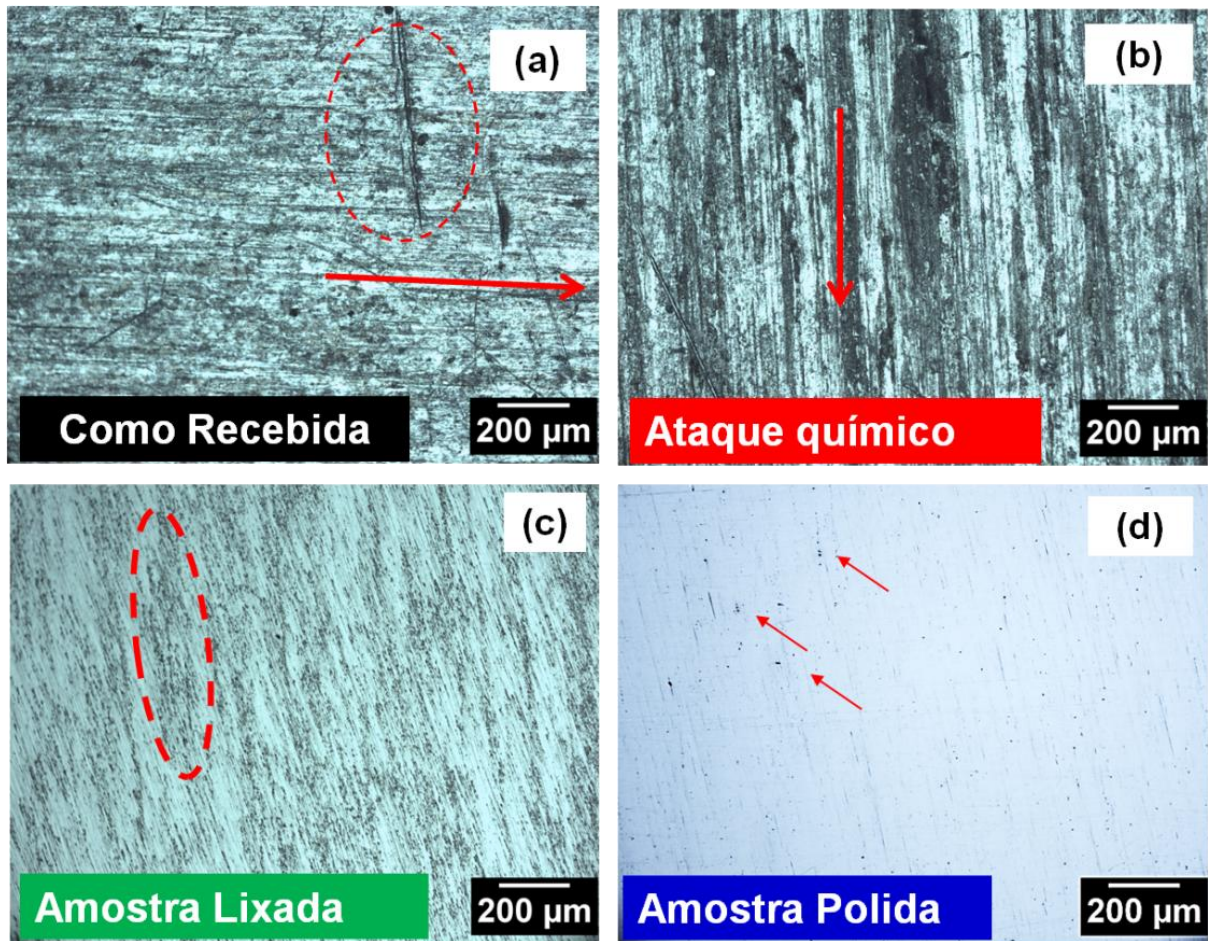


Figura 14. Microscopia ótica da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais. (a) Amostra como recebida; (b) Amostra atacada quimicamente; (c) Amostra Lixada; (d) Amostra Polida. Fonte: Autor.

Os diferentes acabamentos conferiram características diferentes para cada superfície. Na amostra como recebida, Figura 14(a), observam-se defeitos (região circular) que se relacionam ao processo de laminação das chapas. Além disso, bandas de óxidos ricas em Mg foram observadas, conforme reportado na literatura (MA et al, 2015). Estas se formam como um resultado do processo de difusão favorecido pelas temperaturas atingidas na superfície das chapas quando estas são laminadas (MURAYAMA et al, 2001; REICH et al, 1998). A amostra atacada quimicamente, Figura 14(b), apresentou regiões de ataque preferencial associadas aos grãos mais reativos da liga. Óxidos também foram observados, entretanto oriundos do ataque a matriz de alumínio pelo hidróxido de sódio. Na condição lixada, Figura 14(c), observou-se um leve ataque da superfície que permitiu revelar os

grãos da superfície. A amostra polida, Figura 14(c), apresentou uma superfície mais uniforme e as partículas micrométricas, presentes nas ligas de alumínio, foram facilmente identificadas, conforme indicado pelas setas vermelhas.

As superfícies das amostras também foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), Figura 15. Partículas micrométricas são facilmente identificadas pelo contraste entre a matriz e os precipitados, proporcionado pela diferença de composição química das fases. Na Figura 15(a) observa-se que as partículas micrométricas são menores e distribuídas de maneira aleatória sobre a superfície da amostra como recebida. Estas características estão associadas ao processo de conformação cujas tensões atingidas na superfície favorecem a quebra desses precipitados. Com a remoção desta camada, Figura 15(b), observa-se que a distribuição dessas partículas ocorre principalmente no sentido de laminação, conforme observado pelas setas vermelhas. A formação dessas partículas ocorre durante o processo de fundição, devido à redução da solubilidade do Fe e Cu na matriz com o resfriamento do material conforme reportado por Ma et al. (2011).

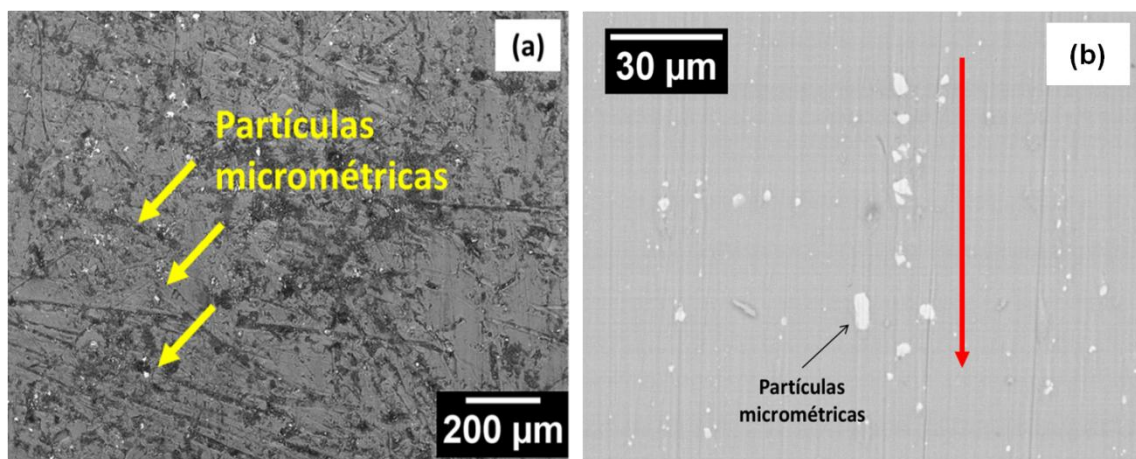


Figura 15. - Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais. (a) Amostra como recebida; (b) Amostra polida. Fonte: Autor.

Com objetivo de se caracterizar quimicamente a superfície das amostras, mapas de EDS (Espectroscopia por energia dispersiva) também foram adquiridos para todas as superfícies avaliadas neste trabalho, Figura 16.

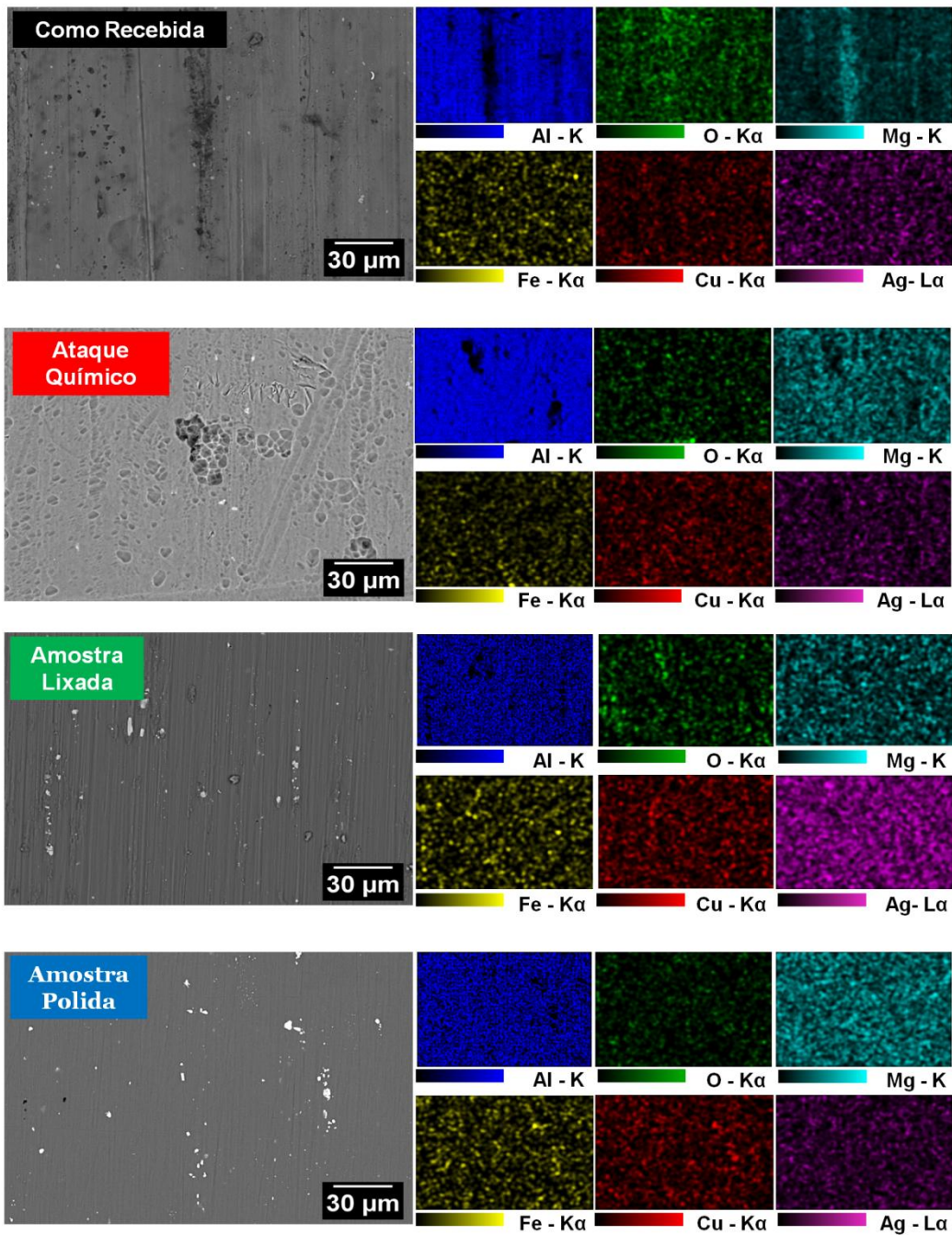


Figura 16. Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície da liga AA2098-T351 com seus respectivos mapas de EDS para os diferentes acabamentos superficiais analisados. Fonte : Autor.

A aquisição dos mapas de EDS permitiram confirmar a presença das bandas de óxido enriquecidas em Mg, como relatadas na literatura e, características das amostras como recebidas. Além disso, os sinais de Fe e Cu observados relacionam-se as partículas micrométricas presentes na superfície. Na amostra atacada quimicamente, os mapas de O foram relacionados com os mapas de Mg, indicando que o ataque químico da superfície como recebida, pode favorecer a precipitação de óxido de Al ricos em Mg. Nas amostras lixada e polida fica evidente a presença das partículas micrométricas ricas em Cu e Fe.

Além de mapas de EDS, análises pontuais também foram realizadas, na matriz da superfície da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais. A Figura 17 apresenta a composição química média da matriz obtida com base nas análises pontuais.

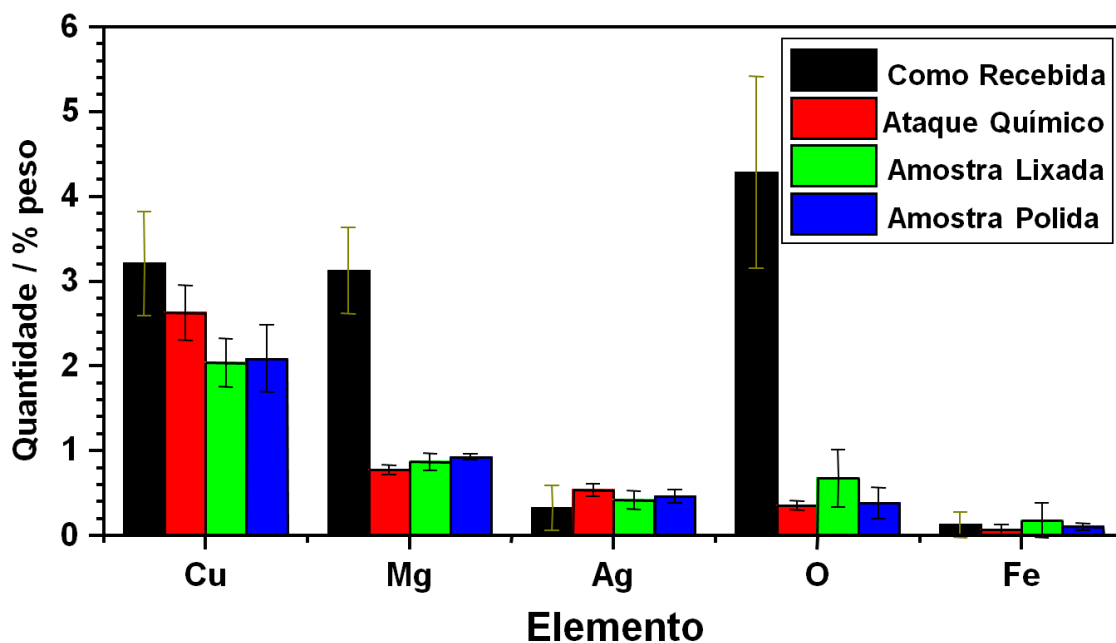


Figura 17. Composição química média da matriz da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais obtidas por análise pontual de EDS. Fonte: Autor.

Observa-se maiores teores médios de O, Mg e Cu na amostra como recebida em relação as demais condições. Portanto, com a remoção desta camada das amostra, seja por ataque químico ou por processos mecânicos de lixamento e polimento, os teores de Mg e O são reduzidos, indicando que o comportamento eletroquímico da

camada superficial da amostra como recebida será significativamente influenciado pela presença de Mg. Além disso, o teor de Cu é elevado para esta condição o que pode estar relacionado a processos difusionais devido às temperaturas atingidas na superfície das chapas durante a conformação (SUN e HAN, 2020) e, a melhor distribuição das partículas micrométricas que são quebradas durante o processo como observado na Figura 15. Na amostra atacada quimicamente, os altos níveis Cu e Ag encontrados na superfície, podem estar relacionados à dissolução preferencial da fase T1 presentes nos grão mais reativos. Como mencionado, a fase T1 é anódica em relação à matriz de Al, portanto quando a amostra é imersa nas soluções de pré-tratamento os grãos com maior densidade de fase T1 são atacados. O mecanismo de corrosão da fase T1 (Al_2CuLi) inicia-se com a dissolução preferencial do Li e a partícula remanescente fica enriquecida em Cu. Além disso, o Cu pode ir para o eletrólito e redepositar nas regiões catódicas próximas ao anodo onde, tem-se excesso de elétrons. A reprecipitação da Ag segue o mesmo mecanismo proposto para o Cu. A Ag é adicionada as ligas de Al-Cu-Li com o intuito de favorecer a precipitação da fase T1 (MURAYAMA et al. 2001). Por este motivo, regiões ricas em Ag podem estar presentes na interface entre a fase T1 e a matriz. Assim, durante a dissolução preferencial da fase T1, a Ag presente no eletrólito também pode se redepositar nas regiões catódicas próximas ao anodo.

Além da caracterização química, análises de perfilometria ótica 3D das superfícies da liga 2098-T351 foram realizadas. Os resultados são mostrados na Figura 18.

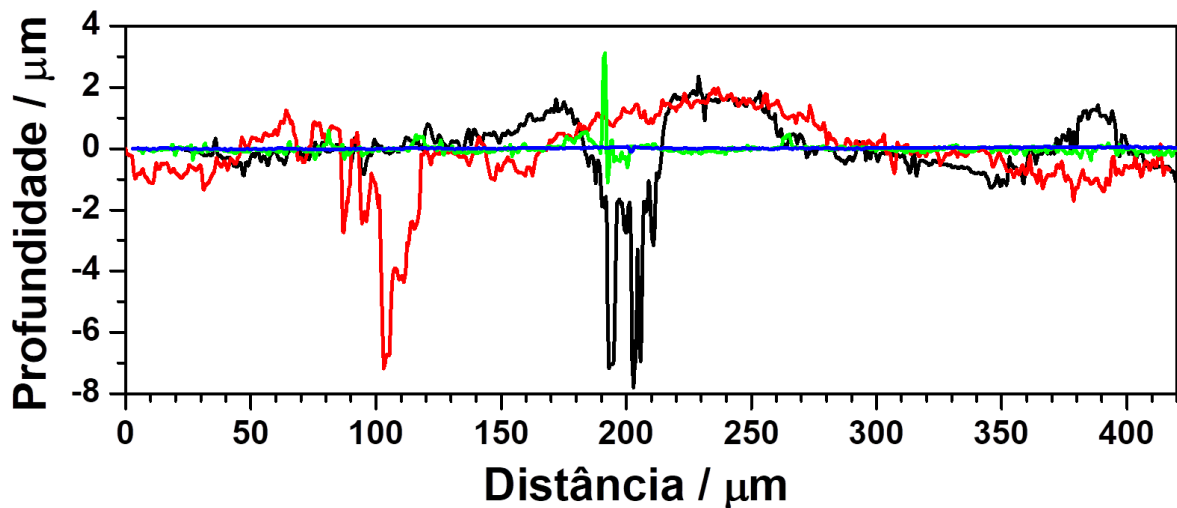
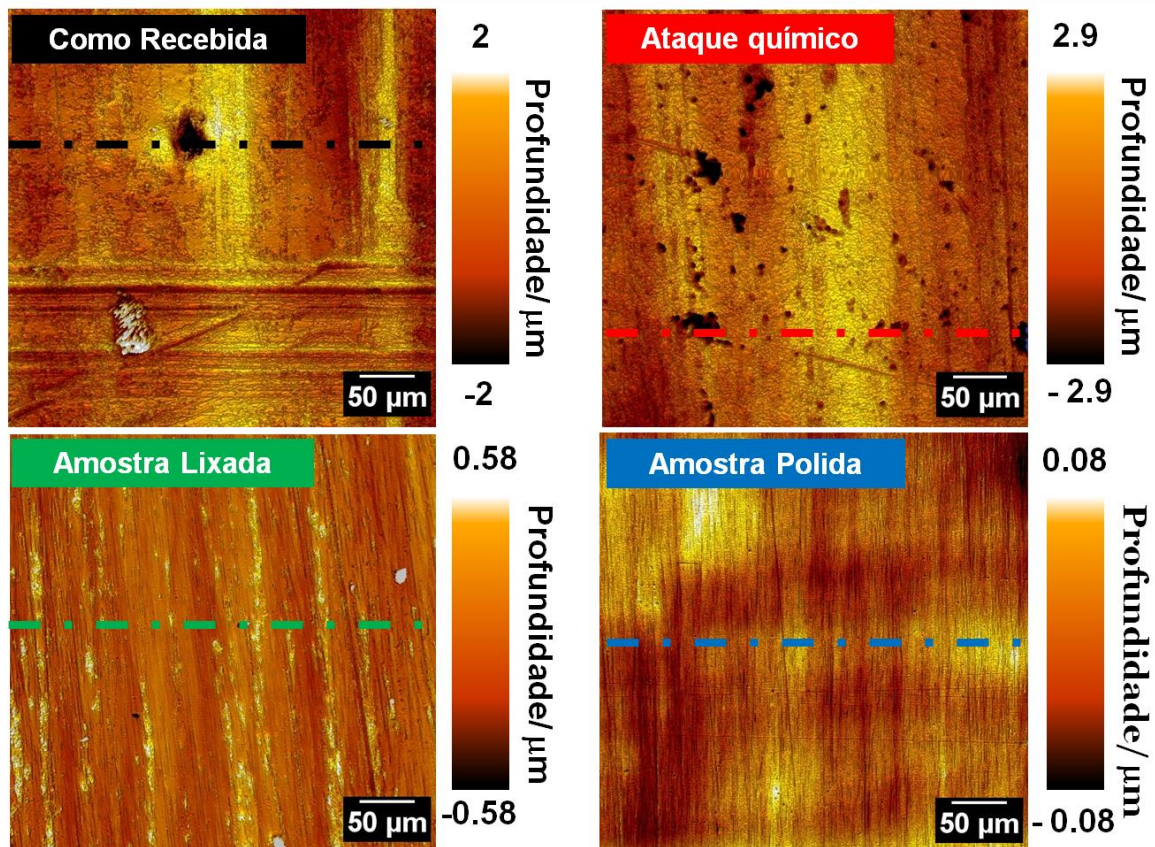


Figura 18. Imagens de perfilometria ótica 3D da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais e perfis de profundidade das superfícies associados às linhas tracejadas. Fonte: Autor.

Conforme observado pelas imagens, superfícies mais irregulares foram observadas para as condições como recebida e atacada quimicamente com profundidades inferiores a $5 \mu\text{m}$. Já as amostras lixada e polida mostraram maior uniformidade. Os

parâmetros de rugosidade de cada condição também foram avaliados, Tabela 3. Sa representa a rugosidade média e são obtidos pela variação do brilho durante a construção da imagem. O SPV é a maior profundidade do vale e está relacionado à presença de arranhões e o Sq é a irregularidade da superfície relacionada à predominância de vales ou picos. Os resultados mostraram que as superfícies atacada quimicamente e como recebida apresentam as maiores rugosidades médias (Sa) em relação às demais condições. Além disso, as barras de erro maiores para a condição atacada quimicamente evidenciaram que o ataque associado a este pré-tratamento não é uniforme. Como o SPV representa o vale de pico mais alto, os valores mais altos para a amostra atacada quimicamente indicam que o ataque preferencial observado em alguns grãos pode ser mais profundo do que o defeito observado, por exemplo, nas amostras como recebida. Os valores positivos de Sq obtidos para todas as amostras indicam a predominância de picos sobre a superfície.

Tabela 4. – Parâmetros de rugosidade obtidos por perfilometria ótica 3D obtidos para a liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais

Acabamento superficial	Spv (µm)	Sq (µm)	Sa (µm)
Como Recebida	16,25 ± 1.68	0,68 ± 0,14	0,54 ± 0,18
Ataque químico	19,24 ± 6.64	1,02 ± 0,34	0,65 ± 0,16
Amostra Lixada	7,24 ± 2.71	0,18 ± 0,01	0,11 ± 0,03
Amostra Polida	1,50 ± 1.47	0,04 ± 0,02	0,03 ± 0,01

Fonte: autor.

5.2 INVESTIGAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO ELETROQUÍMICA DA LIGA 2098-T351

Nos tópicos a seguir os resultados da análise de resistência à corrosão da liga 2098-T351, mecanismos de propagação e a atividade eletroquímica da superfície da liga com diferentes acabamentos superficiais serão discutidos.

5.2.1 Teste de Imersão

Os testes de imersão foram realizados e a superfície das amostras monitoradas desde os primeiros minutos de imersão até 24 h, em solução de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl. A Figura 19 apresenta a evolução da propagação da corrosão em função do tempo.

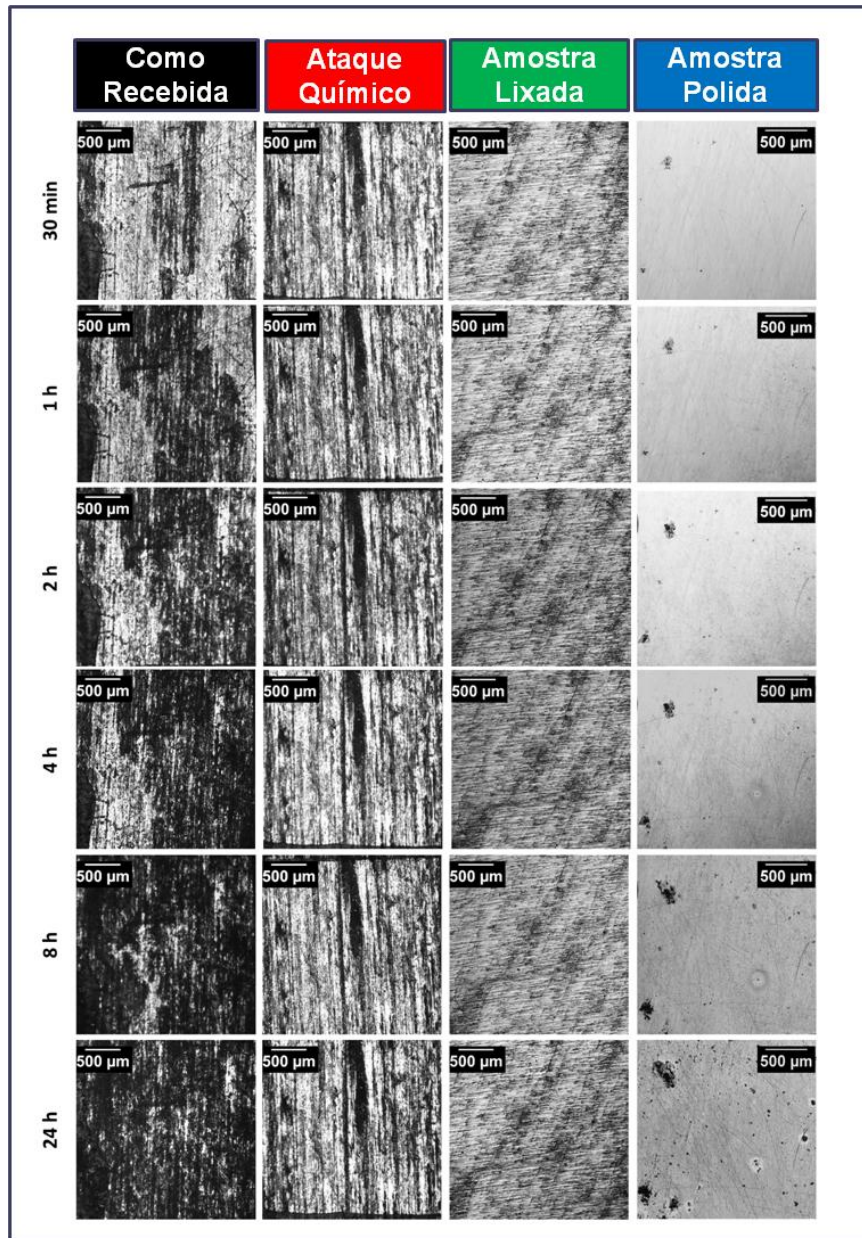


Figura 19. Monitoramento da superfície da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais em solução $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl por 24 h. Fonte: Autor.

A amostra como recebida mostrou-se fortemente ativa desde os primeiros minutos de teste, com formação de produtos de corrosão. O mecanismo de corrosão envolve a propagação do ataque a partir das bandas enriquecidas em Mg. Ataques preferenciais foram observados nas regiões das bandas de óxidos. E com o prosseguimento do teste toda a superfície exposta foi encoberta por produtos de corrosão. O Mg é um elemento bastante reativo e anódico em relação ao Al. Portanto, os resultados indicam que a propagação da corrosão ocorre em bandas, porque as regiões adjacentes as bandas de Mg atuam como catodo, enquanto as regiões ricas em Mg são preferencialmente dissolvidas. Este mecanismo de corrosão associado com as superfícies das ligas Al-Cu-Li na condição como recebida também foi descrito por outros autores (BARBOSA, et al, 2020; MILAGRE, M X. et al. 2019; ARAUJO et al 2019). Nas amostras atacada quimicamente e lixada não foram observadas modificações significativas nas superfícies expostas. Entretanto, observou-se que para a amostra atacada quimicamente as regiões pré-atacadas foram os locais preferenciais para a propagação do ataque localizado. Já para a amostra lixada não foram observadas locais de corrosão localizada severa (CLS) sendo o ataque preferencialmente associado às partículas micrométricas. Regiões CLS foram observadas apenas na amostra polida, no potencial de circuito aberto, desde os primeiros minutos de imersão. Um pequeno aumento dessas regiões foi observado em função do tempo de imersão, bem como, acúmulo de produtos de corrosão sobre a “boca” do pite, indicando que a continuidade do processo se dá no seu interior.

A corrosão por pite (CLS) nas ligas Al-Cu-Li é associada com partícula nanométrica conhecida como fase T1 (Al_2CuLi) (DE et al, 2011). A fase T1 rica em Li é anódica em relação à matriz de Al, e por este motivo, sofre dissolução preferencial (MA et al, 2015). Para a condição atacada quimicamente esses locais com maior densidade de fase T1 são atacados durante o pré-tratamento. Assim, durante a imersão em $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl, essas regiões pré-atacadas tornam-se locais preferenciais para início da corrosão. Sendo a precipitação da fase T1 associada como os grãos mais deformados, a propagação da corrosão ocorre seguindo a orientação desses grãos. No caso das condições lixada e polida os locais com maior densidade de fase T1,

também são locais preferenciais para o desenvolvimento da corrosão por pite. Entretanto, a presença do óxido passivo que se forma naturalmente sobre as ligas de Al, faz com que o ataque ocorra inicialmente nas regiões defeituosas do óxido. No caso da amostra lixada o ataque associado com as partículas micrométricas, também conhecido como *trenching*, foi mais significativo. Neste caso, as partículas micrométricas, ricas em Fe e Cu são catódicas em relação à matriz e, por este motivo, no entorno das partículas ocorre a dissolução do Al formando trincheiras ou valas. Este ataque também ocorre na amostra polida, entretanto para esta condição a CLS é predominante.

5.2.2 Caracterização eletroquímica

A fim de se analisar a atividade eletroquímica das amostras estudadas neste trabalho, curvas de polarização anódicas foram obtidas após 30 min de imersão em $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl, Figura 20.

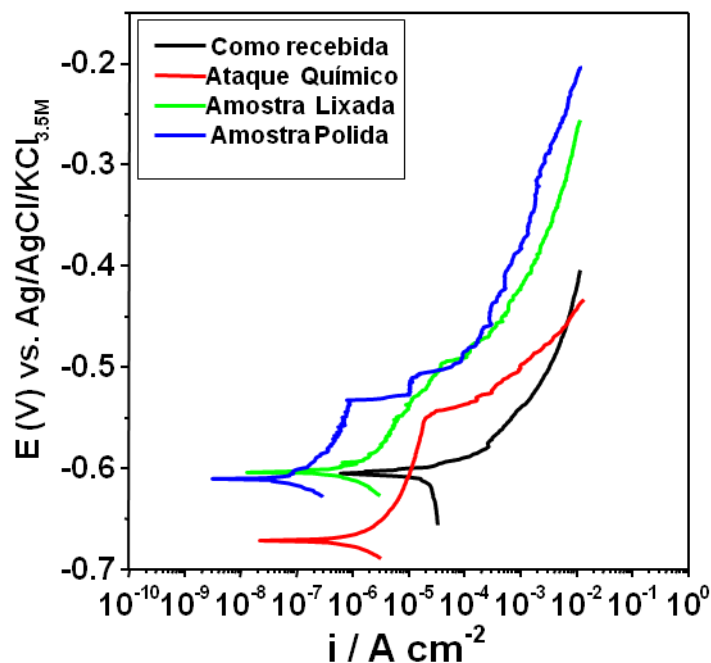


Figura 20. Curvas de polarização anódica obtidas para a liga 2098-T351 após imersão por 30 min em solução $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl. Fonte: Autor.

A amostra como recebida apresentou maiores densidades de corrente, corroborando com os resultados obtidos pelo teste de imersão que indicaram maior atividade eletroquímica para esta liga. Em seguida, a amostra atacada quimicamente apresentou o segundo maior valor de densidade de corrente. Já o deslocamento para a esquerda das curvas referentes às amostras lixada e polida indica uma menor atividade eletroquímica dessas amostras.

A distribuição não uniforme da corrente relacionadas a materiais que sofrem corrosão localizada tornam as técnicas eletroquímicas convencionais pouco adequadas para análise do comportamento eletroquímico das ligas Al-Cu-Li. Técnicas eletroquímicas locais tem sido reportadas como úteis para a avaliação da resistência à corrosão dessas ligas (BUGARIN, 2020; MACHADO et al 2019; ARAUJO et al, 2020; QUEIROZ, 2008) e em particular da liga 2098-T351 (DA SILVA, et al 2019; MILAGRE, et al, 2020). Por este motivo, ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica local (LEIS) também foram realizados. A Figura 21 apresenta os mapas de admitância 3D obtidos, após a imersão das amostras em solução de $0,005 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl.

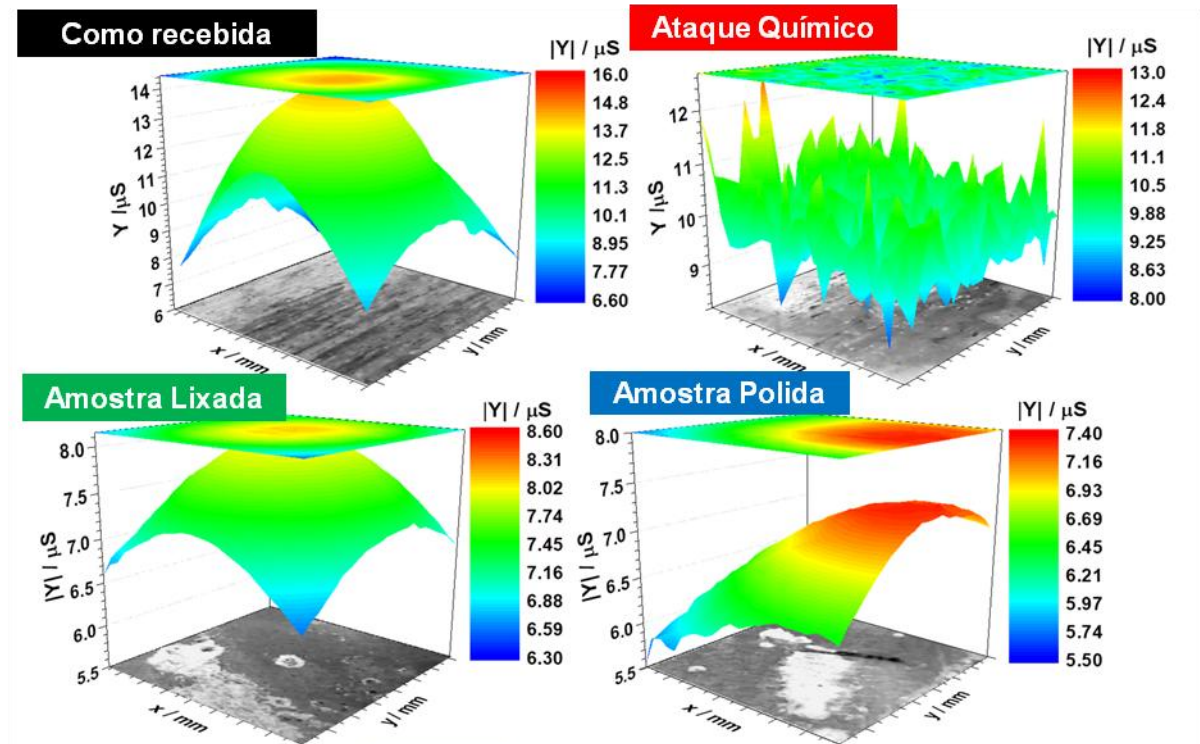


Figura 21. Mapas em 3D de admitância obtidos para liga 2098-T351 após 24 h de imersão em solução 0,005 mol L⁻¹ de NaCl. Fonte : Autor.

Os resultados de LEIS corroboram com as curvas de polarização obtidas para cada um dos acabamentos superficiais estudados. Menores valores encontrados de admitância foram obtidos para a amostra polida seguida da amostra lixada. Além disso, as regiões de maiores admitância foram associadas às regiões de CLS para essas amostras. Já as amostras como recebida e amostra atacada quimicamente apresentaram os maiores valores de admitância. Sendo a admitância o inverso da impedância, pode-se concluir que com os resultados obtidos que a atividade eletroquímica das superfícies analisadas é crescente na seguinte ordem: Polida < Lixada < Atacada Quimicamente < Como Recebida.

Após os ensaios as amostras foram analisadas por MEV e mapas de EDS das superfícies foram adquiridos, Figura 22.

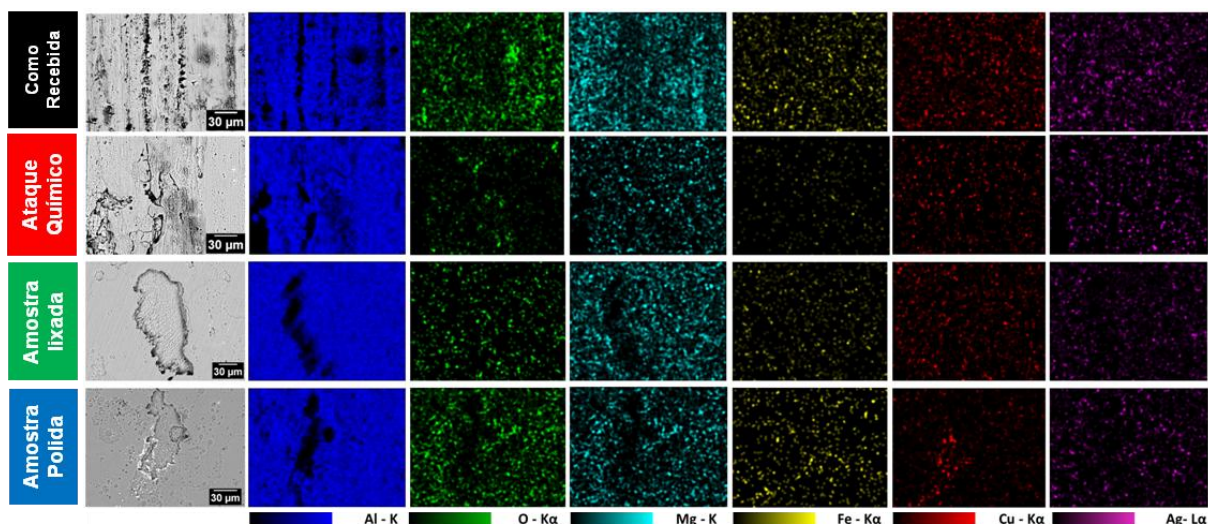


Figura 22. Imagem de microscopia eletrônica de varredura e respectivos mapas de EDS das superfícies da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos após 24 h de imersão em NaCl. Fonte: Autor.

Observaram-se sinais de Mg associados ao O nas regiões próximas ao ataque localizado, confirmando que a dissolução preferencial deste elemento ocorre, quando a amostra como recebida é exposta a meios corrosivos. Sinais de Cu e Ag foram observados nas superfícies da amostra atacada quimicamente. Como mencionado, Cu e Ag se redepõem sobre a superfície das amostras, quando esta é quimicamente atacada. Uma vez que Cu e Ag apresentam potenciais eletroquímicos maiores que o Al presente na matriz da liga 2098-T351, essas regiões de redeposição atuam como catodo em relação às regiões adjacentes que atuam como anodo. Como esses elementos se redepõem nas regiões catódicas nas proximidades dos grãos que foram mais susceptíveis à corrosão durante o pré-tratamento, o processo de corrosão é favorecido nas regiões pré-atacadas. Já para as amostras lixada e polida, os sinais de Cu e Ag estão associados às regiões adjacentes a CLS, em que a fase T1 é preferencialmente dissolvida e, como abordado anteriormente, a redeposição desses elementos é favorecida nas áreas catódicas adjacentes.

Análises de perfilometria ótica 3D nas regiões de corrosão localizada da liga 2098-T351 com diferentes acabamentos superficiais também foram realizadas após os ensaio de LEIS em $0,005 \text{ mol L}^{-1}$ de NaCl, Figura 23

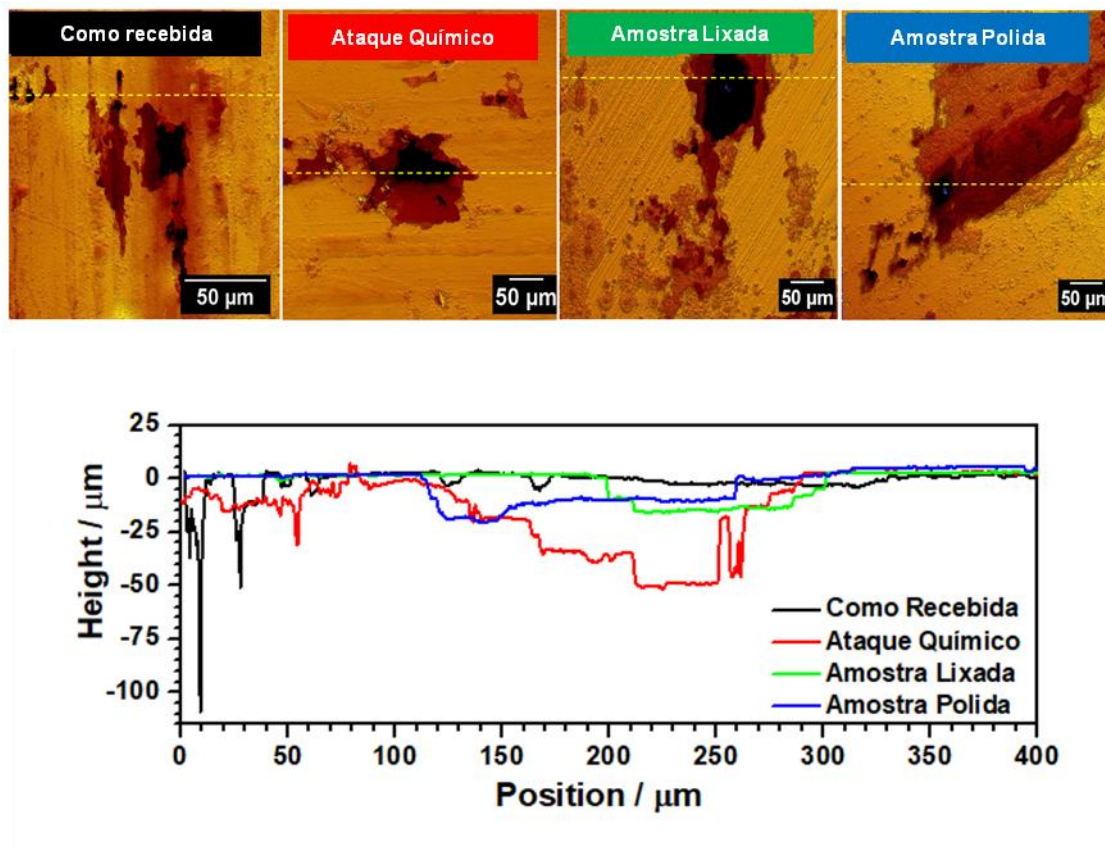


Figura 23. Perfilometria ótica 3D das amostras após ensaio de LEIS por 24 horas em 0.005 mol L^{-1} de NaCl. Fonte: Autor.

Os resultados indicaram maiores profundidades de pite para a condição como recebida, seguida da condição atacada quimicamente. Estes resultados são consequência da maior atividade eletroquímica dessas superfícies. O processo de corrosão por pite envolve a oxidação do metal com formação de cátions metálicos, seguida pela hidrólise e acidificação do meio. Os elétrons gerados pelas reações de oxidação são consumidos por reações catódicas, próximas ao anodo. Na amostra como recebida, as regiões enriquecidas em Mg são pequenas em relação à área catódica. Da mesma forma a deposição de Cu e Ag sobre a superfície da amostra atacada quimicamente aumenta a área catódica em relação a áreas anódicas (fase

T1). Esta relação de área entre anodo e catodo, é a responsável pela severidade da corrosão localizada. Quanto menor o anodo em relação ao catodo, maior será a profundidade do ataque, pois os elétrons produzidos nas áreas anódicas são facilmente consumidos nas áreas catódicas e com isso o processo de propagação do pite é favorecido. A profundidade dos pites observados na amostra lixada em relação à amostra polida, indica maior atividade da amostra polida em relação à amostra lixada. Entretanto, os resultados eletroquímicos indicam o contrário. Este comportamento pode ser relacionado à formação de produtos de corrosão sobre regiões de ataque localizado na superfície da amostra polida reduzindo os sinais de corrente captados pelos equipamentos. Apesar de reduzido o sinal na superfície das amostras, as condições do meio no interior do pite contribuem para a manutenção do processo corrosivo e por este motivo maiores profundidades de pite são observadas nessas regiões.

Em resumo os resultados obtidos neste trabalho indicam que, dependendo do tipo de acabamento superficial, a liga 2098-T351 pode apresentar diferentes características superficiais como variações microestruturais, diferentes composições químicas e rugosidade. Essas variações irão influenciar tanto a atividade eletroquímica da liga quanto a sua resistência à corrosão. Portanto, as condições de pré-tratamento antes da aplicação de tratamentos para aumento da resistência à corrosão da liga 2098-T351 devem ser levadas em consideração.

6. CONCLUSÕES

- A liga de Al-Cu-Li 2098-T351 apresentou susceptibilidade à corrosão localizada independentemente do tipo de acabamento superficial.
- A composição química da superfície, microestrutura e rugosidade foi fortemente influenciada pelo tipo de acabamento superficial;
- A atividade eletroquímica e resistência à corrosão da liga 2098-T351 é modificada segundo o tipo de acabamento superficial aplicado;
- Testes de imersão e eletroquímicos identificaram maiores atividades eletroquímicas para as condições como recebida e atacada quimicamente;
- Na condição como recebida a propagação da corrosão está relacionada com as bandas de óxidos ricas em Mg;
- Para a condição atacada quimicamente, a redeposição de Cu e Ag na superfície da liga após o pré-tratamento favorecem a atividade eletroquímica da superfície;
- A corrosão das amostras lixadas e polidas foi associada à dissolução preferencial da fase T1 em relação à matriz e a corrosão associada as partículas micrométricas;

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de anodização e caracterização das amostras com diferentes pré-tratamentos superficiais.
- Investigar o comportamento da liga no processo de anodização em banho tartárico-sulfúrico (TSA).
- Selagem da liga anodizada após diferentes pré-tratamentos e caracterização das superfícies .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL, Associação Brasileira do alumínio, fundamentos e aplicações do alumínio. São Paulo, 2012. Disponível em: <[http:// www.abal.org.br/fundamentos-e-aplicacoes-do-aluminio/](http://www.abal.org.br/fundamentos-e-aplicacoes-do-aluminio/)> Acesso em 02 de novembro de 2021.

ABREU, F. et. al. Avaliação da resistência à corrosão da liga de alumínio 6101 após diferentes tratamentos térmicos de precipitação. *Corros. Prot. Mater.*, v. 31, n. 3/4, p. 65- 70.

ALUMINUM ASSOCIATION et al. Aluminum: properties and physical metallurgy. ASM International, 1984.

ARAUJO, J. V.d. S. Influência dos tratamentos termomecânicos na microestrutura e no comportamento de corrosão da liga AA2198. 2019. 120p. Dissertação. (Mestrado em tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEM/ SP, São Paulo.

ARAUJO, João Victor de Sousa et al. Microstructural, Electrochemical and Localized Corrosion Characterization of the AA2198-T851 Alloy. *Materials Research* [online]. 2020, v. 23, n. 4 [Accessed 5 December 2021] , e20200161. Available from: <<https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0161>>. Epub 14 Sept 2020. ISSN 1980-5373.

ARAUJO, João Victor de Sousa et al. O PROCESSO DE ANODIZAÇÃO DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS: UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E ELETROQUÍMICA. *Química Nova* [online]. 2021, v. 44, n. 08 [Acessado 10 Dezembro 2021] , pp. 999-1011. Disponível em: <<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170748>>. Epub 27 Set 2021. ISSN 1678-7064.

ASM SPECIALTY Handboook. Aluminum and aluminum alloys in aluminum-lithium alloys. (1993). Ohio: ASM International. p. 121.

ASOH, Hidetaka et al. Condições para a fabricação de alumina anódica porosa idealmente ordenada usando Al pré-texturizado. **Journal of the Electrochemical**

Society , v. 148, n. 4, pág. B152, 2001.

Bakker, H. (1980). Difusão em sólidos cristalinos. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde Serie A*, 46 (2), 56-59.

BARBOSA, Wanessa et al. Caracterização e comportamento de corrosão da liga 2098-T351 Al-Cu-Li após diferentes pré-tratamentos de anodização. *PIDEB de Iniciação*, 2p.2020.

BUGARIN, AFS et al. Efeito da soldagem por fricção e agitação (FSW) no comportamento eletroquímico e no acoplamento galvânico de AA2024-T3 e AA7475-T651. **Materials Today Communications** , v. 25, p. 101591, 2020.

C. Machado, U, Donatus, M Xavier, N Mogili, R.Giorjão, R. Klumpp, J. V. Araujo, R. Ferreira, I. Costa, Correlating the modes of corrosion with microstructure in friction stir welded AA2198-T8 Alloy in aqueous hydrogen peroxide- chloride medium, *Corrosion*. (2019). Doi 10.5006/3054.

CALLISTER JR, W. D.; *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 8ed. LTC. Rio de Janeiro,2012.

CAPELOSSI, VR et al. Proteção contra corrosão da liga de alumínio clad 2024 anodizada em banho de ácido tartárico-sulfúrico e protegida com revestimento híbrido de sol-gel. **Electrochimica Acta** , v. 124, p. 69-79, 2014.

CHEN, Xiaoxue et al. Efeitos do tratamento térmico na microestrutura e propriedades mecânicas da liga 2196 Al-Cu-Li extrudada. **Materiais e Design** , v. 192, p. 108746, 2020.

DA SILVA, Rejane Maria P. et al. O comportamento eletroquímico local do AA2098 - T351 e os efeitos da preparação de superfície investigados por microscopia eletroquímica de varredura. **Análise de superfície e interface** , v. 51, n. 10, pág. 982-992, 2019.

DA SILVA, Tarsila Tenório Luna et al. Influência dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento artificial na dureza de uma liga de AL com 5, 5% de

CU produzida via metalurgia do pó. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, n. 2, p. 1166-1179, 2021.

DAVIS, Joseph R. (Ed.). **Corrosão de alumínio e ligas de alumínio**. Asm International, 1999.

DE ABREU, Caio Palumbo. **Caraterização da reatividade das ligas de alumínio AA2024-T3 E AA7475-T651 soldadas por fricção (FSW)**. 2016. Tese de Doutorado. Université Pierre et Marie Curie-Paris 6; Universidade de São Paulo (Brésil).

DE SC MACHADO, Caruline et al. Efeito dos tratamentos de superfície na resistência à corrosão localizada da liga de alumínio e lítio AA2198 - T8 soldada pelo processo FSW. **Análise de superfície e interface**, v. 51, n. 12, pág. 1231-1239, 2019.

DE, PS; MISHRA, RS; BAUMANN, John A. Caracterização do comportamento de fadiga de alto ciclo de uma liga de alumínio-lítio de nova geração. **Acta Materialia**, v. 59, n. 15, pág. 5946-5960, 2011.

DESCHAMPS, A. et. AL. Precipitation in AL-Cu_Li ALloys: from the Kinetics of T1 Phase Precipitation to microestructure Developmet in friction stir welds. **13th international Conference on aluminum alloys**, p 1145-1154, 2012.

DIMOGERONTAKIS. T, Lampros Kompotiatis, Irene Kaplanoglou, Oxygen evolution during the formation of barrier type anodic film on 2024-T3 aluminium alloy, *Corrosion Science*, Volume 40, Issue 11,1998, p.1939-1951, ISSN 0010-938X, [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00114-0](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00114-0).

DONATUS, U., M.Tarada, C. R. Ospina, F. M. Queiroz, A. Fatima Santos Bugarin, I.Costa, On the AA2198-T851 Alloy microestructure annt its correlation with localizaed corrosion bahaviour, *corros. Sci.* (2017). Doi: 10.1016/j.corsci.2017.12.001.

DONATUS, U., R.O. Ferreira, N. V. V. Moili, B. V. G. D Viveiros, M. X. Milagre, I.

Costa, Corrosion and anodizing behaviour of friction stir Weldment of AA2198- T851 Al-Cu-Li alloy, *Maater. Chem. Phys.* 219 (2018).
Doi10.1016/j.matchemphys.2018.08.053.

E, A. et al. High Strength Al-alloys: Microstructure, Corrosion and principles of protection. **Recent trends in processing and degradation of aluminium alloys**, 2011.

FAHRENHOLTZ, W.G. et al Characterization of cerium-based conversion coatings for corrosion protection of aluminum alloys. *Surface and Coatings Technology*, v.155, p.208-213, 2002.

GUILLAUMIN. V, Mankowski G. Corrosão localizada da liga de alumínio 2024 T351 em meio de cloreto. *Corros Sci.* 1998; 41 (3): 421-438.

HUNTER, J. A. et al. Evolution of Near-Surface Deformed Layers on AA3104 Aluminium Alloy. **Materials Science Forum**, v. 765, p. 358–362, 2013.

KAUFMAN, John Gilbert. **Properties of aluminum alloys: fatigue data and the effects of temperature, product form, and processing**. ASM International, 2008.

KEDDAM, M. et al. Exfoliation corrosion of aluminium alloys examined by electrode impedance. **Electrochimica Acta**, v. 42, n. 1, p. 87-97, 1997.

LAVERNIA, E. J GRANT, N. J(1987). Aluminium-Lithium alloys. *Journal of Materials science* may 1987, Volume 22, Issue 5, PP 1521-1529.

LI, J. F. et al. Study on localized corrosion mechanism of 2195 Al-Li. Alloy in 4.0% NaCl solution (pH 6.5) using a three-electrode coupling system. *Materials and corrosion*, v. 56, n3, p. 192-196, 2005).

LIN, F. S., CHAKRAVORTY, S. B., STARKE, E. A., 1982. Microstructure – property relationships of two Al-3Li-2Cu-0,2cd alloys. *Metall. Trans.* A13:401-410 .

LIN, Yi et al. Efeito do tratamento de envelhecimento nas microestruturas, propriedades de tração e comportamento de corrosão intergranular da liga Al – Cu – Li. **Caracterização de materiais** , v. 141, p. 163-168, 2018.

MILAGRE, Mariana X. et al. Comparação da resistência à corrosão de uma liga de Al – Cu e uma liga de Al – Cu – Li. **Engenharia de corrosão, ciência e tecnologia** , v. 54, n. 5, pág. 402-412, 2019.

MA, Y. et al. Discontinuities in the porous anodic film formed on AA 2099-T83 aluminium alloy. *Corrosion Science*, v. 53, n. 12, p. 4141-41151, 2011.

MA, Y. et al. Localized corrosion in AA2098-T83 aluminum-lithium alloy: the role of intermetallic particles. *Materials chemistry and physics*, v. 161, p. 201-210, 2015.

MA, Yanlong et al. Corrosão localizada na liga de alumínio-lítio AA 2099-T83: o papel da orientação do grão. **Corrosion Science** , v. 107, p. 41-48, 2016.

MACHADO, CSC et al. Avaliação da resistência a corrosão intergranular da liga AA 2198-T851 soldada pelo processo FSW.p9, 2016

MACHADO, Isabel. Tratamentos térmicos e de superfície. **Prof. Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo. Depto. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos PMR**, 2002.

MARCUS, Philippe; MAURICE, Vincent. Caracterização do nível atômico em estudos de corrosão. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences** , v. 375, n. 2098, pág. 20160414, 2017.

MARTENDAL. Alumínio tem problemas com corrosão. Disponível em: <http://engenheirodemateriais.com.br/2016/10/12/aluminio-nao-tem-problemas-com-corrosao-certo-ou-errado/> . Acesso em: 15 nov. 2019.

Menezes, André William ENDURECIMENTO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO ENDURECÍVEL POR PRECIPITAÇÃO EM DIFERENTES CONDIÇÕES INICIAIS/ A. W. Menezes . São Paulo, 2019. 53p.

MILAGRE, M. X. ; DONATUS, U ; MACHADO, C. S. C. ; ARAUJO, J. V.S. ; DA SILVA, R. M. P. ; DE VIVEIROS, B. V. G. ; ASTARITA, A. ; COSTA, I . Comparison of the corrosion resistance of an Al-Cu alloy and an Al-Cu-Li alloy. *CORROSION ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY* v. 54, p. 1-11, 2019.

MILAN, M. T.; MALUF, O.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W. W. *Metais: uma visão objetiva*. Suprema. São Carlos, 2004.

MURAYAMA, M.; HONO, K. Role of Ag and Mg on precipitation of T1 phase in an Al-Cu-Li-Mg-Ag alloy. *Scripta Materialia*, v. 44, n. 4, p. 701- 706, 2001.

NASCIMENTO, F. M. Felipe. *Processo por fricção linear : Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6*. p 113 Instituto Superior técnico da Universidade técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

PALUMBO DE ABREU, Caio. **Caracterização da reatividade das ligas de alumínio AA2024-T3E AA7475-T651 soldadas por fricção (FSW)**. 2016. Tese de Doutorado. Paris 6.

PENG, Zhuowei et al. Efeito de diferentes processos de envelhecimento no comportamento à corrosão de novas ligas Al – Cu – Li – Zr – Sc. *Materiais e corrosão* , v. 70, n. 12, pág. 2266-2277, 2019.

PISSINATTI, Marco Aurélio Slemer; SOUZA, Renato Chaves; DUARTE, Roberto Nunes. Estudo da microestrutura e microdureza da liga de alumínio 2524 de aplicação aeroespacial após diferentes condições de tratamentos térmicos de recozimento, solubilização 87 -97.

POLMEAR, I. J. Recent developments in light alloys. *Materials Transactions*, v. 37, n 1, p. 12-31, 1996.

QUEIROZ, F. M. Estudo do comportamento de corrosão dos intermetálicos presentes na liga AA2024-T3, por meio de técnicas de microscopia associadas à técnicas eletroquímicas. 2008. 246 f. Universidade de São Paulo. 2008.

R.G. Grant, Flight: the Complete History of Aviation., Dorling Kindersley Limited, London, 2017.

RUNGE, Jude Mary. Considerações microestruturais do metal básico para anodizar substratos de alumínio. In: **A Metalurgia da Anodização do Alumínio** . Springer, Cham, 2018. p. 373-431.

SALEM, HG; LYONS, JS Efeito da extrusão angular de canal igual na microestrutura e superplasticidade de uma liga de Al-Li. **Jornal de engenharia de materiais e desempenho** , v. 11, n. 4, pág. 384-391, 2002.

SANKARAN, K.K, GRANT, N, J. 1980.The structure and properties of splant-quenched aluminum alloy 2024 containing lithium additions. Mater. Sci. Eng 44:213-227.

SERDECHNOVA, Met al. On the cathodic dissolution of AL and Al alloys. Electrochimia Acta, v 124, n. RPTIL, p. 9-16,2014.

SILVA, José Ildon Saraiva. Caracterização microestrutural e mecânica de ligas diluídas de alumínio-nióbio. 2017.

Sun Q.e Han Q. Surface segregation phenomenon of surface severe plastic deformed Al–Zn–Mg–Cu alloys. Materialia, v. 11, 100741, 2020.

SZKLARSKA-SMIALOWSKA, Z. Corrosão por pite do alumínio. **Ciência da corrosão** , v. 41, n. 9, pág. 1743-1767, 1998.

TAYLOR, Christopher D. Modelagem molecular da estrutura e reatividade na interface metal / ambiente. **Modelagem Molecular de Processos de Corrosão: Desenvolvimento Científico e Aplicações de Engenharia** , p. 35, 2015.

VASUDEVAN, Asuri K .; DOHERTY, Roger D. (Ed.). **Ligas de alumínio - Pesquisa e aplicações contemporâneas: Pesquisa e aplicações contemporâneas** . Elsevier, 2012.

XAVIER MILAGRE, M. **Investigação da Resistência a corrosão microestrutural da liga de alumínio 2098-T351 soldada por fricção e mistura (FSW)**. 2019.234p. Tese (Doutorado em tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

ZHANG, X et al. The propagation of localized corrosion in Al-Cu-Li alloy. *Surface and Interface Analysis*, v. 48, n. 8, p. 745-749, 2016.