

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**ISABELLE VITÓRIA FREITAS RODRIGUES
NÍCOLAS NASCIMENTO DE SOUSA PEREIRA
THAÍS CAROLINE MACÊDO DA ROSA**

**ANÁLISE DE CORROSÃO EM LIGAS
AERONÁUTICAS UTILIZADAS EM TANQUES DE
COMBUSTÍVEL**

São José dos Campos
2024

**ISABELLE VITÓRIA FREITAS RODRIGUES
NÍCOLAS NASCIMENTO DE SOUSA PEREIRA
THAÍS CAROLINE MACÊDO DA ROSA**

**ANÁLISE DE CORROSÃO EM LIGAS
AERONÁUTICAS UTILIZADAS EM TANQUES DE
COMBUSTÍVEL**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Projetos de Estruturas Aeronáuticas.

Orientadora: Dra. Heide Heloise Bernardi

São José dos Campos
2024

**FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal
Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação**

RODRIGUES, Isabelle Vitória Freitas

Análise de corrosão em ligas aeronáuticas utilizadas em tanques de combustível. / Isabelle Vitória Freitas, Nicolas Nascimento de Sousa, Thais Caroline Macêdo da Rosa. – São José dos Campos, 2024.

44f. (número total de folhas do TG)

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáutica. Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2024.

Orientadora Dra. Heide Heloise Bernardi.

1. Corrosão. 2. Ligas de Alumínio. 3. Tanque de Combustível. I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, Isabelle Vitória Freitas; PEREIRA, Nicolas Nascimento de Sousa; ROSA, Thais Caroline Macêdo da. **Análise de corrosão em ligas aeronáuticas utilizadas em tanques de combustível**. 2024. 44 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Projetos de Estruturas Aeronáuticas - Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2024.

**ISABELLE VITÓRIA FREITAS
RODRIGUES NÍCOLAS NASCIMENTO DE
SOUSA PEREIRA THAÍS CAROLINE
MACÊDO DA ROSA**

**ANÁLISE DE CORROSÃO EM LIGAS
AERONÁUTICAS UTILIZADAS EM TANQUES DE
COMBUSTÍVEL**

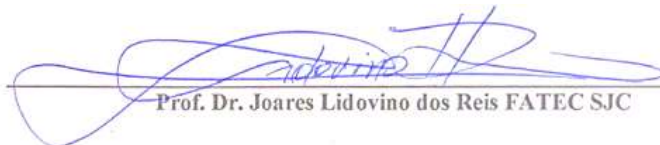
Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Projetos de Estruturas Aeronáuticas.



Dra. Heide Heloíse Bernardi – FATEC SJC



Prof. Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi FATEC SJC



Prof. Dr. Joares Lidovino dos Reis FATEC SJC

03/12/2024

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste Trabalho de Graduação. Sem o apoio e dedicação de diversas pessoas, este projeto não teria sido possível. Agradecemos, primeiramente, à nossa orientadora, Heide Heloíse Bernardi, pela orientação, paciência, e pelos valiosos conselhos que nos guiaram durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise e apoio constante foram fundamentais para a conclusão deste projeto. Agradecemos também aos professores e colegas do curso de Projetos de Estruturas Aeronáuticas, que, de maneira direta ou indireta, ajudaram com discussões enriquecedoras, sugestões e críticas construtivas. Cada interação foi essencial para o aprimoramento do nosso trabalho. A nossa família merece um agradecimento especial. Agradecemos aos nossos pais, pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo nos momentos difíceis e por sempre acreditarem em nossos potenciais. Sem o amor e suporte de vocês, nós não teríamos chegado até aqui.

Por fim, agradecemos a todas as pessoas e instituições que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com informações, recursos ou apoio técnico.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

O objetivo principal do estudo foi analisar o comportamento da corrosão em ligas de alumínio da série 2xxx, especialmente a 2024, submetidas a diferentes tratamentos térmicos e com CLAD (camada de alumínio puro), imersas em combustível JET-A, com base na norma ASTM G1-72. A corrosão em materiais metálicos, especialmente em tanques de combustível de aeronaves, é um problema sério, devido à presença de água no combustível, que favorece a corrosão. A corrosão, pode gerar falhas graves, como entupimento de filtros, danos às bombas de combustível e até falhas estruturais nas aeronaves. A pesquisa focou em investigar esse fenômeno em ligas aeronáuticas que possuem propriedades adequadas para o uso em estruturas de aviões, como leveza, resistência mecânica e resistência à corrosão. O estudo utilizou várias etapas experimentais, incluindo a preparação das amostras de ligas de alumínio, como corte, polimento e a criação de riscos nas amostras para simular danos no revestimento CLAD. As amostras foram então submetidas a ensaios de corrosão em combustível JET-A em duas condições: bruto e filtrado. Antes do ensaio de corrosão as amostras foram caracterizadas microestruturalmente e mecanicamente. Após diferentes períodos de imersão, foram realizadas análises da morfologia das superfícies corroídas usando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), assim como determinação da taxa de corrosão e perda de massa. Os resultados indicaram variações significativas na corrosão dependendo do tipo de liga e das condições de exposição ao combustível. As ligas com tratamento CLAD mostraram melhor resistência à corrosão em comparação com aquelas sem a camada de proteção, especialmente nas amostras imersas em combustível filtrado. A análise de perda de massa e taxa de corrosão mostrou que a presença de tratamento superficial e a filtragem do combustível reduziram a progressão da corrosão.

Palavras-Chave: Combustível JET-A; Corrosão; Ligas de Alumínio.

ABSTRACT

The main objective of the study was to analyze the corrosion behavior of 2xxx series aluminum alloys, especially 2024, subjected to different heat treatments and with CLAD (pure aluminum layer), immersed in JET-A fuel, based on the ASTM G1-72 standard. Corrosion in metallic materials, especially in aircraft fuel tanks, is a serious problem due to the presence of water in the fuel, which favors corrosion. Corrosion can cause serious failures, such as filter clogging, damage to fuel pumps and even structural failures in aircraft. The research focused on investigating this phenomenon in aeronautical alloys that have properties suitable for use in aircraft structures, such as lightness, mechanical strength and corrosion resistance. The study used several experimental steps, including the preparation of aluminum alloy samples, such as cutting, polishing and creating scratches on the samples to simulate damage to the CLAD coating. The samples were then subjected to corrosion tests in JET-A fuel under two conditions: raw and filtered. After different immersion periods, analyses of the morphology of the corroded surfaces were performed using Scanning Electron Microscopy (SEM). The results indicated significant variations in corrosion depending on the type of alloy and the conditions of exposure to the fuel. The alloys with CLAD treatment showed better corrosion resistance compared to those without the protective layer, especially in the samples immersed in filtered fuel. The analysis of mass loss and corrosion rate showed that the presence of surface treatment and fuel filtration reduced the progression of corrosion.

Keywords: JET-A Fuel; Corrosion; Aluminum Alloys.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Objetivo Geral	10
1.2. Objetivos Específicos	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1. Ligas de Alumínio	11
2.1.1. Propriedades da Liga de Alumínio 2024	13
2.1.2. Diagramas de Fases da Liga de Alumínio 2024	14
2.1.3. Tratamento Térmico e Precipitação da Segunda Fase	14
2.1.4. Importância da Precipitação da Segunda Fase	15
2.2. Corrosão	16
2.3. Tanques de Combustível Aeronáutico	16
2.3.1. Presença de água nos combustíveis aeronáuticos	17
2.3.2. Combustível JET A	18
2.3.3. Corrosão em tanques de combustível	21
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	22
3.1. Materiais	22
3.1.1. Alumínio	22
3.1.2. Combustível Jet A	24
3.2. Preparação da Superfície das Amostras para o ensaio de corrosão	24
3.2.1. Corte	24
3.2.2. Medição e Pesagem	24
3.2.3. Polimento	24
3.2.4. Risco	25
3.3. Preparo do combustível e imersão das amostras	26
3.4. Ensaio de Corrosão	27
3.5. Microscopia	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1. Aspecto inicial das amostras	30
4.1.1. Aspecto inicial das amostras dia 02/07/2024	29
4.1.2. Aspecto inicial das amostras dia 05/09/2024	30
4.2. Resultados do teste de Imersão	35
5. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

A corrosão é o resultado da interação entre um metal e os elementos do seu ambiente, levando à conversão do metal para um estado não metálico, ocorrendo a deterioração eletroquímica do material. Nesse processo, o metal perde suas características essenciais, como resistência mecânica, elasticidade e ductilidade. O produto resultante da corrosão geralmente apresenta propriedades muito inferiores em comparação com o metal original (RAMANATHAN, 1997).

Há muitos anos a corrosão microbiológica no interior dos tanques de combustíveis, vem sendo um problema constante, devido à natureza perigosa dos combustíveis de aviação, esse sistema representa um risco elevado em casos de acidentes aéreos, sendo a corrosão, um dos maiores problemas, em razão de que todos os combustíveis derivados de hidrocarbonetos, apresentam alguma quantidade de água suspensa e dissolvida. A quantidade de água presente no combustível varia conforme a temperatura e o tipo de combustível. O combustível JET-A, com seu teor aromático mais elevado, tem uma propensão maior a absorver água em comparação com a gasolina de aviação, o que favorece a corrosão microbiológica em aeronaves (HANGAR MMA, 2019).

Os procedimentos de deterioração eletroquímica podem ser acionados ou acelerados por determinados tipos de microrganismos, sob certas circunstâncias, resultando no fenômeno conhecido como deterioração microbiana, microbiológica ou bacteriológica, pode-se destacar os casos de deterioração microbiológica em reservatórios de combustível de aeronaves a jato. É relevante destacar que o papel dos microrganismos se manifesta pela alteração do ambiente, tornando-o corrosivo ou ampliando sua corrosividade (DUTRA, NUNES, 2006).

A corrosão microbiológica dentro dos tanques de combustível integrais tem sido uma preocupação recorrente para todos os operadores de aeronaves equipadas principalmente com motores a reação (jato) ou turbo-hélice. Esses microrganismos podem levar à falha dos motores devido ao bloqueio dos filtros e avarias nas bombas de combustível, ou até mesmo a falhas estruturais como resultado direto dessa corrosão (HANGAR MMA, 2019). Visto isso, o intuito desse trabalho é analisar a corrosão em ligas de alumínio da série 2024, utilizando ensaios de corrosão por imersão em combustível JET-A.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a corrosão em ligas de alumínio, pertencentes à série 2xxx, com diversos tratamentos térmicos e com tratamento superficial CLAD, seguidos de ensaios de corrosão por imersão em combustível JET-A, conforme a norma ASTM G1-72.

1.2. Objetivos Específicos

Para a consecução deste objetivo geral foram estabelecidos os objetivos específicos:

- Caracterização inicial das amostras de alumínio aeronáutico utilizando Microscopia Eletrônica de varredura (MEV);
- Preparar as amostras de alumínio aeronáutico da série 2024, por meio de corte e polimento para o ensaio de corrosão por imersão;
- Conduzir os ensaios de corrosão por imersão (norma ASTM G1-72) usando combustível JET-A, tanto bruto, quanto filtrado, utilizando como filtro, fibra de carbono ativada;
- Realizar a caracterização morfológica das amostras por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o ensaio de corrosão por imersão;
- Efetuar a análise e interpretação dos resultados obtidos nas amostras ensaiadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio desempenham um papel crucial em diversas indústrias, incluindo aeronáutica, devido às suas propriedades únicas que combinam leveza, resistência e durabilidade. As ligas de alumínio são materiais metálicos compostos principalmente por alumínio (Al) e outros elementos metálicos em proporções variáveis. A adição de outros elementos à matriz de alumínio visa melhorar as propriedades mecânicas e térmicas do metal, tornando-o mais adequado para aplicações específicas. Os principais elementos adicionados às ligas de alumínio incluem cobre (Cu), zinco (Zn), magnésio (Mg), manganês (Mn) e silício (Si). Cada elemento tem um papel específico na melhoria das propriedades da liga. Por exemplo, o cobre aumenta a resistência, o magnésio contribui para a leveza e a resistência à corrosão, enquanto o silício melhora a resistência à fluência (ABAL, 2012; ALCOA, 2010).

A indústria aeronáutica é um dos maiores consumidores de ligas de alumínio. As características ideais dessas ligas tornam-nas valiosas para várias aplicações, incluindo: estruturas de aeronaves, componentes internos, sistemas de propulsão e painéis de revestimento. Portanto, as ligas de alumínio desempenham um papel importante na indústria aeronáutica, proporcionando uma combinação única de características que atendem aos rigorosos requisitos de desempenho, eficiência e segurança (ASHBY e JONES, 2007).

A constante evolução dessas ligas, juntamente com avanços tecnológicos na metalurgia e engenharia, continua a impulsionar o desenvolvimento de aeronaves mais eficientes e avançadas. De acordo com Zangrandi (2008), podem-se descrever as principais características que alguns elementos conferem as ligas quando adicionados ao alumínio:

- Zinco: Possui a capacidade de elevar a resistência mecânica do alumínio ao permitir o endurecimento por meio da precipitação natural e artificial na liga.
- Cobre: Facilita o endurecimento por precipitação natural, ampliando a resistência mecânica, mas reduzindo a resistência à corrosão, ductilidade e soldabilidade da liga.
- Magnésio: Aumenta a resistência à corrosão em ambientes de água salgada, diminui o endurecimento por deformação e a temperatura de fusão. Quando combinado com silício, contribui para o endurecimento por precipitação da liga.

- Silício: Aprimora a ductilidade, resistência mecânica, temperatura de fusão e aumenta a fluidez da liga.

- Manganês: Colabora para o aprimoramento da resistência mecânica do alumínio comercialmente puro, bem como a resistência à corrosão, embora cause uma leve redução na ductilidade.

As ligas de alumínio possuem dois tipos de classificações, são elas: fundidas ou forjadas. As ligas de alumínio fundidas são ligas para produção de peças fundidas (fundição em areia, fundição sob pressão, fundição em molde permanente, etc). Já as ligas de alumínio forjadas, passam por processos de laminação, extrusão, forjamento, estiramento, ou seja, processos de conformação mecânica. Estes dois grupos se subdividem em: Ligas não Tratáveis e Ligas Tratáveis Termicamente (ASKELAND e PHULÉ, 2008).

Sendo fundida ou forjada, as ligas de alumínio, seguem o sistema de classificação da *Aluminum Association* (AA) de 1971, que consiste em um número de quatro dígitos (aceito internacionalmente).

Além da classificação das séries quanto à composição química, a *Aluminum Association* também estabeleceu um sistema de classificação quanto ao tipo de tratamento térmico e também quanto ao tipo de trabalho mecânico. Após os quatro dígitos existe uma letra e, possivelmente, um número que indica o tratamento mecânico e/ou térmico ao qual a liga foi submetida. Por exemplo, a letra F significa como fabricado; a letra H significa que a liga está encruada; o O significa recozido; W apenas endurecido e o T que a liga foi tratada termicamente (envelhecimento). Além disso, a letra T é sempre seguida por um ou mais dígitos. Números de 1 a 10 indicam sequências de tratamentos específicos. Por exemplo, T3 = solidificado, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente e T4 = solidificado e envelhecido naturalmente (ASKELAND e PHULÉ, 2008).

Além disso, algumas ligas possuem CLAD, que significa que foi aplicada uma camada de proteção de alumínio puro antes de ser completado o processo final de laminação (*Rolling Process*) do material (METALTHAGA, 2023).

As ligas utilizadas nesse trabalho são da série 2xxx, sendo elas, 2024 O CLAD, 2024 T3 CLAD, 2024 T4 e 2024 T3. Essa liga é composta por AL-Cu e Al-Cu-Li.

2.1.1 Propriedades da Liga de Alumínio 2024

A liga de alumínio 2024 é uma das ligas mais amplamente utilizadas em aplicações

que exigem alta resistência mecânica, especialmente na indústria aeronáutica. Sua excelente combinação de resistência à tração e resistência à fadiga torna-a ideal para componentes estruturais que enfrentam cargas cíclicas. O processo de tratamento térmico é crucial para melhorar as propriedades da liga 2024, uma vez que a precipitação de uma segunda fase durante o envelhecimento é responsável por grande parte do aumento de resistência. A seguir, detalharemos as características e propriedades da liga 2024, a importância do tratamento térmico e o mecanismo de precipitação da segunda fase.

A liga 2024 pertence à série 2xxx de ligas de alumínio, cuja principal característica é a presença de cobre como elemento de liga. Sua composição química típica inclui:

- Cobre (Cu): Aproximadamente 4,4%
- Magnésio (Mg): Aproximadamente 1,5%
- Manganês (Mn): Aproximadamente 0,6%
- Silício (Si) e Ferro (Fe): Em quantidades menores. (DAVIS, 1993)

As principais propriedades da liga 2024 incluem:

- Alta resistência à tração: Pode atingir valores próximos de 470 MPa em sua forma tratada.
- Boa resistência à fadiga: Essencial para aplicações sujeitas a ciclos repetitivos de carga, como em aeronaves.
- Ductilidade moderada: Embora apresente boa capacidade de deformação, a resistência à tração pode reduzir a ductilidade em algumas condições.
- Resistência à corrosão: Embora boa, a resistência à corrosão da liga 2024 não é tão alta quanto de outras ligas de alumínio, sendo, portanto, mais suscetível à corrosão em ambientes agressivos.

2.1.2 Diagramas de Fases da Liga de Alumínio 2024

A liga 2024 apresenta um diagrama de fases complexo devido à presença de múltiplos elementos de liga. O diagrama ilustra as transformações de fase em função da temperatura e da composição, destacando a formação de precipitados intermetálicos

durante o tratamento térmico. No diagrama de fases da liga 2024, as fases principais incluem:

- Fase α (solução sólida de alumínio): A fase predominante em temperaturas elevadas.
- Fase θ (CuAl₂): Uma fase intermetálica de cobre-alumínio que se precipita durante o envelhecimento.

Esse diagrama é importante para entender como o tratamento térmico pode alterar a microestrutura da liga e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas. (HATCH, J. E. 1984)

2.1.3 Tratamento Térmico e Precipitação da Segunda Fase

O tratamento térmico da liga 2024 é realizado para maximizar suas propriedades de resistência, especialmente a resistência à tração e à fadiga. O processo envolve duas etapas principais: **solução solidificada** e **envelhecimento**.

Solução Solidificada: A liga 2024 é aquecida a uma temperatura elevada, geralmente entre 490°C e 520°C, para dissolver os precipitados intermetálicos de CuAl₂ presentes no material. Após esse aquecimento, o material é resfriado rapidamente, geralmente por imersão em água, para evitar que esses precipitados se formem imediatamente.

Envelhecimento (Natural ou Artificial): Após a solução solidificada, o material passa pelo processo de envelhecimento, que pode ocorrer de duas formas:

- **Envelhecimento natural:** O material é deixado à temperatura ambiente, e o processo de precipitação ocorre lentamente ao longo de dias ou semanas.
- **Envelhecimento artificial:** A liga é aquecida a uma temperatura controlada, entre 160°C e 180°C, por um período de tempo específico, acelerando a precipitação dos compostos intermetálicos.

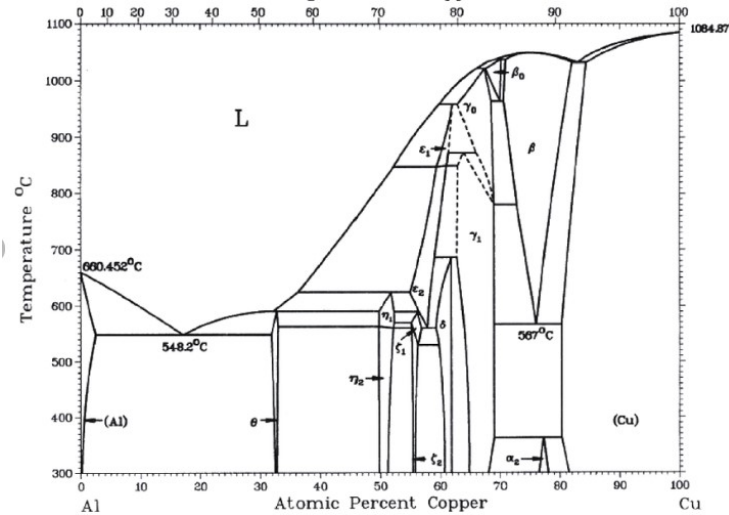
Durante o envelhecimento, ocorre a precipitação da fase θ (CuAl₂), uma fase intermetálica que aumenta a resistência da liga. Essa precipitação age como uma barreira ao movimento das deslocações, dificultando a deformação plástica do material e, assim, aumentando sua resistência mecânica.

2.1.4 Importância da Precipitação da Segunda Fase

A precipitação da segunda fase (CuAl₂) é o principal mecanismo responsável pelo

aumento da resistência da liga 2024. Durante o envelhecimento, o tamanho e a distribuição dos precipitados podem ser controlados, o que permite otimizar as propriedades mecânicas do material. O ajuste adequado desses precipitados é essencial para melhorar a resistência à tração e à fadiga da liga sem comprometer excessivamente sua ductilidade. Esse processo é especialmente importante em aplicações aeronáuticas e outras indústrias onde componentes sujeitos a cargas cíclicas necessitam de alta resistência sem perda significativa de desempenho estrutural. A Figura 1, mostra um exemplo de Diagrama de fases da liga 2xxx.

Figura 1. Diagrama de fases.



Fonte: Research Gate (2014).

2.2 Corrosão

A oxidação, como também é denominada a corrosão, ocorre quando um metal sofre uma transformação química, acarretando na deterioração do mesmo (HANGAR MMA, 2024). Tais danos podem ser encontrados na superfície, ou ainda, na parte interna do material, podendo, além de fragilizar o interior, prejudicar peças adjacentes (HANGAR MMA, 2019).

Pode-se classificar a corrosão de duas formas: ataque químico direto e ataque eletroquímico. O metal é convertido em um composto metálico tipo óxido, hidróxido ou sulfato, em ambos os tipos de corrosão. No processo de corrosão ocorrem, paralelamente, duas alterações: o metal oxidado sofre alteração anódica, enquanto o agente corrosivo é reduzido, numa alteração catódica (HANGAR MMA, 2019).

É importante ressaltar que, a corrosão acontece de forma natural, sendo inviável a

sua extinção. Por tanto, para reduzir os impactos decorrentes da oxidação, é importante agir na prevenção da mesma, retirando agentes que favoreçam sua expansão (HANGAR MMA, 2019).

O alumínio e suas ligas são materiais amplamente utilizados na área aeronáutica, tanto nas estruturas quanto em seções frágeis de aviões, como é o caso dos tanques de combustível, considerado o local mais propenso à corrosão dentro da aeronave. Isso ocorre pois os tanques estão expostos a dois agravantes corrosivos: presença de água nos combustíveis, e presença de elementos de liga, que os torna ainda mais suscetíveis à corrosão. (SANCY, PAEZ, VEJAR, ORREGO, 2024).

2.3. Tanques de Combustíveis Aeronáuticos

Os tanques são responsáveis por armazenar o combustível da aeronave e geralmente ficam localizados entre as longarinas dianteira e traseira e entre os revestimentos superior e inferior da asa. A capacidade do tanque varia de acordo com a aeronave, na parte superior do tanque fica localizada a boca de abastecimento, a fim de facilitar a entrada de combustível por gravidade. Há ventilação nos tanques através dos suspiros de modo que mantenha a pressão do tanque semelhante à pressão atmosférica externa, frequentemente são instalados no bocal de abastecimento, mas podem haver tubos na superfície da asa. Drenos são importantes, pois evitam o transbordamento de combustível, a fim de preservar a estrutura do tanque (HANGAR MMA, 2024).

Nervuras reforçadas selam as extremidades dos reservatórios, à medida que outras nervuras servem de obstáculo para o combustível no tanque. Com o objetivo de que o combustível não se desloque da área das bombas, há duas nervuras em cada asa contendo válvulas unidirecionais.

Há vários indicadores na cabine de comando, entre eles estão (HANGAR MMA, 2024):

- Indicador de quantidade de combustível em cada tanque;
- Indicador de baixa pressão de combustível;
- Indicador de temperatura de combustível.

2.3.1. Presença de água nos combustíveis aeronáuticos

Os combustíveis à base de hidrocarbonetos possuem, em sua totalidade, certa quantidade de água dissolvida. Tal característica é considerada a maior causa dos problemas de contaminação de combustível (HANGAR MMA, 2019).

Água livre é essencial para o crescimento microbiano ativo. Na ausência de água livre, os micróbios podem sobreviver, mas ficam inativos. A água no combustível pode vir do transporte de água do mar de cargas, água da chuva, ou da condensação. Essa água geralmente começa como água livre no fundo ou como condensado em superfícies, mas pode mais tarde se tornar uma dispersão de água no combustível. Os micróbios produzem mais água como um subproduto da degradação de hidrocarbonetos. O crescimento ocorrerá inicialmente na interface combustível/ água (onde os nutrientes do combustível são abundantes), no fundo de água livre e em superfícies molhada. (EDWARD, GRAHAM, 2008).

O combustível utilizado no estudo, JET-A, utilizado em aeronaves equipadas com motores a reação (a jato) ou turbo-hélice, tende a absorver mais água que os demais combustíveis, por conta de seu maior conteúdo aromático, favorecendo, assim, a corrosão microbiológica no tanques em que será despejado (HANGAR MMA, 2019).

Como já visto, o combustível de aviação vem de diversas fontes diferentes. Os limites nominais para água livre no combustível de aviação estão normalmente na faixa de 0-15 ppm (DE), enquanto outros combustíveis podem tolerar faixas mais altas. ((EDWARD, GRAHAM, 2008)

2.3.2. Combustível JET A

O combustível JET-A é um derivado de petróleo, sendo obtido pelo método de destilação direta com temperatura de 150°C a 300°C. É importante que o derivado de petróleo mostre atributos à geração de energia para motores de turbina a gás, vários critérios físico-químicos são necessários ao longo do seu período de fabricação, que incluem desde fluidez, estabilidade, até a combustão para esses motores. Há várias exigências de qualidade, entre elas estão:

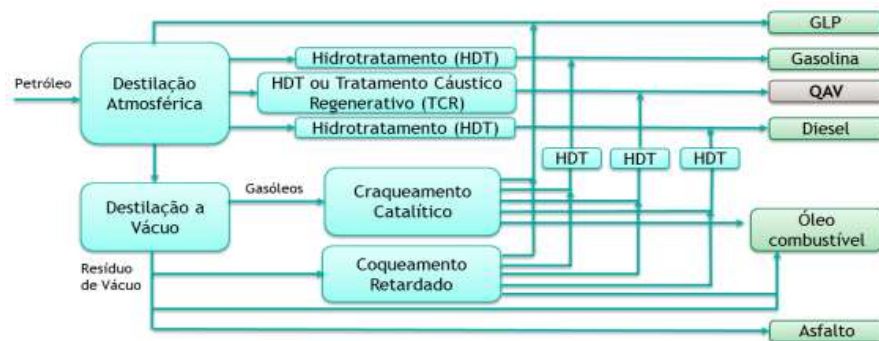
- Aparência clara;
- Fornecer autonomia máxima durante o voo;
- Facilitar as partidas da aeronave;

- Não provocar desgaste no material da turbina.



Na produção do combustível o método utilizado é o processo de refino a destilação atmosférica seguido de tratamento de acabamento (PETROBRÁS, 2021). O esquema da produção do combustível, está sendo exemplificado, na Figura 2.

Figura 2. Esquema da produção do combustível.



Fonte: Petrobrás (2021).

A composição do combustível resultante do método de processo de refino a destilação atmosférica seguido de tratamento de acabamento está especificado nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 1. Dados do combustível obtido pelo processo de refino a destilação.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO	
			ABNT NBR	ASTM
APARÊNCIA				
Aspecto	-	Claro, límpido e isento de água não dissolvida e material sólido à temperatura ambiente	14954 (1)	D4176 (1)
Cor	-	Anotar	14921	D156 D6045
Partículas Contaminantes, máx. (2)	mg/L	1,0	-	D5452 D2276
COMPOSIÇÃO				
Acidez total, máx.	mgKOH/g	0,015	-	D3242
Aromáticos, máx. (3)	% volume	25,0	14932	D1319 (29) D8267 (30) D8305 (30)
	% volume	26,5	-	D6379
Enxofre total, máx.	% massa	0,30	14533	D1266 D2622 D4294 D5453
Enxofre mercaptídico máx. ou Ensaio Doctor (4)	% massa	0,0030 negativo	6298 5275	D3227 D4952
COMPONENTES NA EXPEDIÇÃO DA REFINARIA PRODUTORA (5)				
Fração hidroprocessada	% volume	Anotar		
Fração severamente hidroprocessada (6)	% volume	Anotar		
VOLATILIDADE				
Destilação				
Ponto Inicial de Ebulição (PIE)	°C	anotar		
10% vol. Recuperados (T10), máx.	°C	205,0		D86 (7)
50% vol. Recuperados (T50)	°C	anotar	9619	D2887 (8)
90% vol. Recuperados (T90)	°C	anotar	(7)	D7344 (8)
Ponto Final de Ebulição (PFE), máx.	°C	300,0		D7345 (8)
Resíduo, máx.	% volume	1,5		
Perda, máx. (9)	% volume	1,5		
Ponto de fulgor, mín. (10)	°C	38,0	7974	D56 D93 D3828 D7236 (31)
Massa específica a 20°C	kg/m³	771,3 a 836,6	7148 14065	D1298 D4052
FLUIDEZ				
Ponto de congelamento, máx. (11)	°C	47,0 negativos (JET A-1) 40,0 negativos (JET A)	7975	D2386 D5972 D7153 D7154
Viscosidade a 20°C negativos, máx.	mm²/s	8,000	10441	D445 (12) D7042 (12) D7945

Fonte: Petrobrás (2021).

Tabela 2. Dados do combustível obtido pelo processo de refino a destilação (continuação).

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO	
			ABNT NBR	ASTM
COMBUSTÃO				
Poder calorífico inferior, mín.	MJ/kg	42,80		D4529 D3338 D4809
Ponto de fuligem, mín. ou Ponto de fuligem, mín. e	mm mm	25,0 18,0	11909	D1322
Naftalenos, máx. (13)	% volume	3,00		D1840 D8305 (30)
CORROSÃO				
Corrosividade ao cobre (2h a 100°C), máx.		1	14359	D130
ESTABILIDADE				
Estabilidade térmica 2,5h - mín. 260°C queda de pressão no filtro, máx.	mmHg	25 menor que 3 (sem depósito de cor anormal ou de pavão)		D3241
depósito no tubo - método visual (14) (15)				
depósito no tubo - método instrumental, máx. (14) (16)	nm	85		
CONTAMINANTES				
Goma atual, máx. (17)	mg/100 mL	7	14525	D381
Chumbo, máx. (18)	g/L	0,005		D3237
Índice de separação de água, MSEP (19) com dissipador de cargas estáticas, mín. sem dissipador de cargas estáticas, mín.		70 85		D3948
CONDUTIVIDADE				
Condutividade elétrica (20)	pS/m	50 a 600		D2624
LUBRICIDADE				
Lubricidade BOCLE, máx. (21)	mm	0,85		D5001
ADITIVOS				
Antioxidante, máx.	mg/L	24,0		
Desativador de metal (aditivção inicial), máx. (22)	mg/L	2,0		
Desativador de metal (aditivção cumulativa), máx. (22)	mg/L	5,7		
Dissipador de cargas estáticas (aditivção inicial), máx. (23)	mg/L	3		
Dissipador de cargas estáticas (aditivção cumulativa), máx. (23)	mg/L	5		
Inibidor de formação de gelo	% volume	0,07 a 0,15		
Detector de vazamentos, máx. (24)	mg/kg	1		
Melhorador de lubricidade, máx. (25)	mg/L	23		
ENSAIOS COMPLEMENTARES (26)				
Teor de biodiesel, máx. (27)	mg/kg	50		D7797
Aditivo redutor de arrasto em dutos (DRA), máx.	µg/L	72		D7872

Fonte: Petrobrás (2021).

2.3.2. Corrosão em tanques de combustível

Os tanques de combustível de aeronaves e seus componentes geralmente são feitos de ligas de alumínio da série 2xxx e revestidos com uma camada de passivação de conversão química de Alodine 1200 ou uma camada alodizada e, finalmente, protegidos com uma camada orgânica de tinta. Devido às condições de operação da aeronave, este componente era altamente suscetível à corrosão microbiana e foi observado crescimento de fungos no tanque de combustível em 4 meses. Os principais fatores que favorecem esse tipo de corrosão são: temperatura, tempo, água e presença de combustível contaminado. Os microorganismos podem entrar em qualquer tanque de combustível, independente do modelo ou tipo de aeronave, podendo ser transportados pelo ar, água ou pelo próprio combustível contaminado (SILVA e REZENDE, 2002).

A corrosão é um fenômeno natural e espontâneo causado pelo contato de metais com o ar e a umidade, resultando em uma reação química. Normalmente, essa reação é uma oxidação, conhecida popularmente como ferrugem, que torna o material desgastado e poroso, formando resíduos que comprometem sua integridade. Por isso, a corrosão reduz a vida útil dos equipamentos. Existem vários estágios de corrosão, que podem representar um sério problema de segurança (SANTOS, 2023). Nos tanques de combustíveis, é comum a corrosão microbiológica, causada pelo ataque de bactérias ou fungos. Esse tipo de corrosão se caracteriza por apresentar-se de forma afilada, com variação de cores do marrom ao preto, e formar longos fios que criam camadas como tapetes ou glóbulos espalhados. Essa corrosão pode ser provocada por combustível contaminado. Para ilustrar o efeito da corrosão no tanque, a Figura 3 mostra a superfície de um tanque de combustível com crescimento microbiano e a consequente corrosão microbiológica.

Figura 3. Tanque de combustível corroído.



Fonte: IPEN (2002).

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo, são discutidos os materiais empregados no estudo, assim como os procedimentos adotados para viabilizar a análise de corrosão nas ligas de alumínio 2xxx em combustível aeronáutico. As análises centraram-se principalmente em pequenas placas de ligas de alumínio, as quais foram devidamente identificadas por meio de marcações e subsequente corte para a obtenção das amostras. Estas, por sua vez foram imersas em combustível aeronáutico.

3.1. Materiais

3.1.1. Alumínio

Neste projeto foi utilizado o alumínio da série 2xxx, pelo fato dessa liga ser frequentemente utilizada na indústria aeronáutica. As chapas (amostras) foram cortadas e separadas de acordo com os tratamentos térmicos que receberam, sendo eles 2024 T3 CLAD, 2024 T4 CLAD, e 2024 T3 e 2024 O CLAD. A Tabela 4, mostra a composição química da liga 2024 utilizada. A densidade da liga 2024 (ASTM G1-03) corresponde a $2,78 \text{ g/cm}^3$.

Os tratamentos térmicos T3, T4, O e CLAD são processos aplicados ao alumínio e suas ligas com o objetivo de modificar suas propriedades mecânicas e estruturais, de acordo com a aplicação desejada. Cada um desses tratamentos envolve diferentes processos de aquecimento e resfriamento para alcançar características específicas no material.

O tratamento **T3** envolve duas etapas principais: a **solução solidificada** e o **envelhecimento natural**. Primeiro, o alumínio é aquecido a uma temperatura elevada para dissolver as soluções sólidas, e depois é resfriado rapidamente. Após esse resfriamento, a peça é deixada à temperatura ambiente para envelhecer naturalmente, o que melhora sua resistência. O objetivo do T3 é aumentar a resistência do alumínio, especialmente em ligas que contêm elementos como cobre, magnésio, silício ou manganês.

Já o tratamento **T4** também passa pelas etapas de **solução solidificada** e envelhecimento natural. Após o aquecimento e resfriamento rápido, a peça é novamente aquecida a uma temperatura controlada para acelerar o envelhecimento, permitindo que os elementos de liga precipitem de forma mais rápida. O tratamento T4 proporciona uma combinação de boa resistência e boa formabilidade, sendo a resistência superior à do T3, mas com menor capacidade de deformação.

O tratamento **O**, por sua vez, é o **recozimento**, um processo utilizado para suavizar o alumínio e reduzir as tensões internas no material. O alumínio é aquecido a uma temperatura específica e depois resfriado lentamente, o que melhora sua ductilidade, tornando-o mais fácil de ser trabalhado e deformado sem risco de trincas. Esse processo é especialmente útil quando é necessário maior maleabilidade no material.

Por fim, o **CLAD** não é um tratamento térmico, mas um processo de **revestimento**, no qual uma camada de alumínio ou liga de alumínio é aplicada sobre um núcleo de outro material, como aço. Esse processo é utilizado principalmente para proteger o material subjacente contra a corrosão, mantendo a leveza e as propriedades desejadas do alumínio. É frequentemente usado em componentes de aviação e construção naval, onde a resistência à corrosão é essencial.

Os tratamentos T3 e T4 são usados para melhorar a resistência do alumínio, com o T3 envolvendo envelhecimento natural e o T4 envelhecimento artificial. O tratamento O visa melhorar a ductilidade do material, tornando-o mais fácil de trabalhar, enquanto o processo CLAD se refere ao revestimento de um material com alumínio para aumentar sua resistência à corrosão. A Tabela 4 mostra a quantidade dos elementos que compõe a ligas 2024.

Tabela 3 - Composição da Liga de Alumínio 2024 utilizada para o estudo.

Destinação da Grade		Composição em % p							
AA*	ISO R209	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
2024	AlCu4Mg1	0,5	0,5	3,8–4,9	0,30-0,90	1,2–1,8	0,1	0,25	0,15

* *Aluminum Association*

Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (1998).

3.1.2. Combustível JET A

O combustível de jato, também conhecido como querosene de aviação ou JET-A, é um derivado de petróleo que possui uma composição complexa de hidrocarbonetos.

3.2. Preparação da Superfície das Amostras para o ensaio de corrosão

A preparação das amostras de alumínio a serem analisadas, segue a seguinte ordem: corte, polimento, risco e limpeza. Para esta etapa foi utilizado o Laboratório de Ensaio de Materiais Carbonosos e Metálicos da FATEC Prof. Jessen Vidal - São José dos Campos. A seguir estão descritos os seguintes processos: Corte, Polimento e Risco.

3.2.1. Corte

O corte das amostras foi realizado através do equipamento IsoMet 1000 da marca Buehler (Processo: 476030/2011-0 CNPq Universal), aproximadamente com o mesmo formato retangular e dimensões, para padronizar o tamanho das amostras.

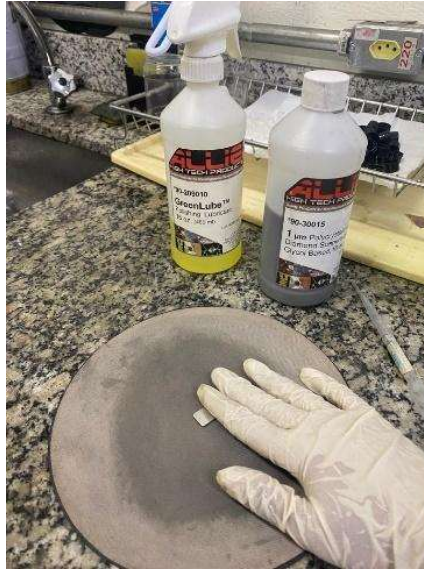
3.2.2. Medição e Pesagem

As medidas das dimensões das amostras de alumínio foram feitas com o auxílio de um paquímetro. As medidas de massa foram realizadas com a balança de precisão da marca BEL ENGINEERING (0,0001 g). A Tabela 5 mostra as dimensões das amostras e o peso.

3.2.3 Polimento

Após o corte das amostras, elas foram limpas em álcool etílico p.a. e após a limpeza, foram polidas manualmente a fim de preservar o CLAD (Figura 4). O polimento foi feito com uma suspensão policristalina de diamante de 1 μm e 6 μm juntamente com um lubrificante, utilizando panos específicos para cada gramatura. Após o polimento, as amostras foram lavadas com água deionizada e álcool etílico p.a. e secadas com ar quente. A Figura 4 mostra o processo de polimento manual.

Figura 4 – Polimento Manual.



Fonte: Autores (2024).

3.2.4 Risco

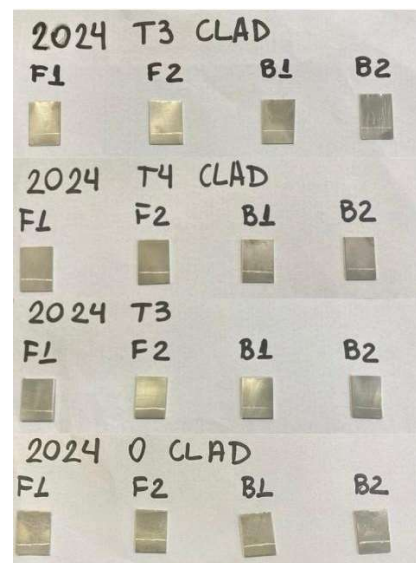
A fim de avaliar um dano causado no CLAD, foi feito um risco na superfície das amostras, utilizando uma caneta gravadora para metal da marca Western P-48. O processo está demonstrado na Figura 4. Na figura 6 pode-se observar as amostras já riscadas.

Figura 5 – Riscos nas chapas.



Fonte: Autores (2024).

Figura 6 – Amostras riscadas.



3.3. Preparo do combustível e imersão das amostras

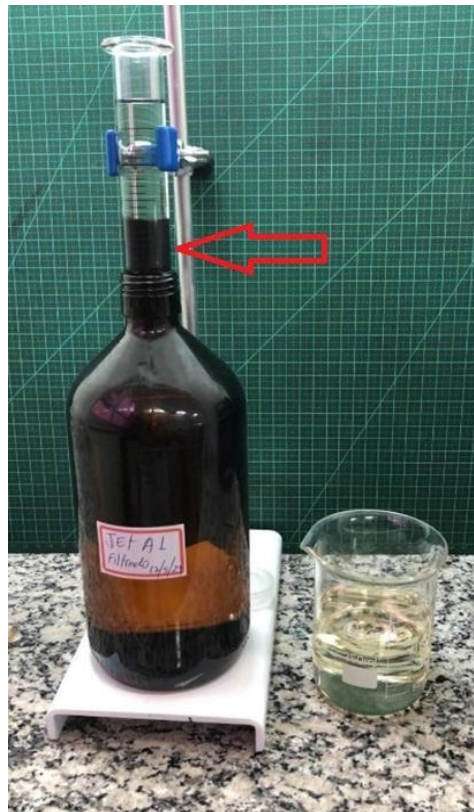
Para analisar o comportamento em meios diferentes, as amostras da liga de alumínio 2024 foram imersas em duas condições:

(a) imersas no combustível JET-A, sem nenhum tipo de tratamento. Essa condição foi nomeada como combustível bruto (B);

(b) imersas no combustível JET-A após filtragem em fibra de carbono ativado (Figura 6). Essa condição foi nomeada como combustível filtrado (F).

A Figura 7 mostra como foi feita a imersão das amostras no combustível JET A, em ambas as condições.

Figura 7 – Filtragem do combustível JET A com fibra de carbono ativada.



Fonte: Autores (2024).

Figura 8 – Imersão das amostras no combustível JET-A.



Fonte: Autores (2024).

3.4. Ensaio de Corrosão

Para o ensaio de corrosão foi adotado o método da imersão por perda de massa, segundo a norma ASTM G 31- 72-2004. As amostras foram colocadas em recipientes individuais fechados, em temperatura ambiente e sem a incidência de luz direta. Foi utilizado para imersão 30 ml de combustível. Os ensaios foram realizados em duplicatas, para ambas as condições de combustível.

As amostras ficaram imersas em períodos de 04/06/2024 , 06/08/2024 e 05/09/2024. Após os períodos de junho e agosto, as amostras foram limpas, pesadas e feito micrografia. Já após o período de setembro as amostras foram apenas limpas e pesadas.

Para a limpeza das amostras, foi feito o seguinte procedimento:

- (a) As amostras foram deixadas por 10 min no ultrassom, dentro de béqueres identificados contendo uma mistura de H₂O deionizada e detergente;
- (b) Foi feito uma segunda limpeza no ultrassom por 10 min utilizando apenas H₂O deionizada;
- (c) Por fim, as amostras foram retiradas dos béqueres e foram limpas com álcool etílico p.a. e em seguida secadas com auxílio de um soprador de calor.

3.5. Microscopia

Nas amostras iniciais e após o período de imersão, foi realizado a microscopia eletrônica de varredura (MEV), que tem como principal intuito fornecer imagens de alta resolução da superfície das amostras, permitindo a análise detalhada de suas características morfológicas e topográficas, com o objetivo de investigar a ação do combustível sobre a superfície das ligas de alumínio, buscando identificar e analisar os efeitos da corrosão.

A análise foi realizada no MEV do Departamento de Materiais e Processos do ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica), da marca TESCAN modelo VEGA3 equipado com detector de elétrons secundários (SE), utilizando uma voltagem de 15 kv.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

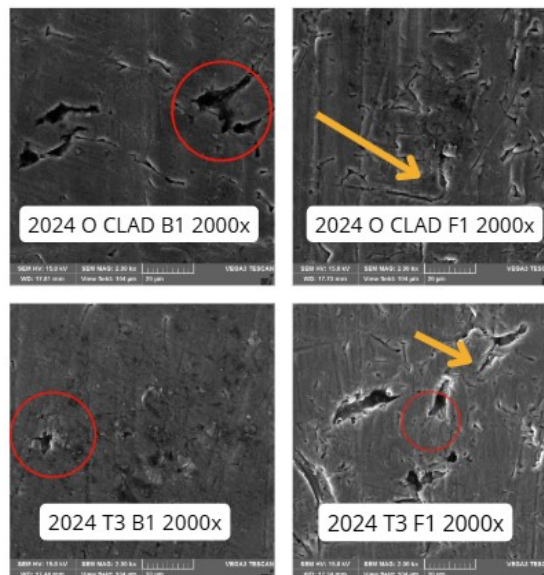
4.1 Aspecto inicial das amostras

Após as retiradas das amostras do tempo de imersão, foram realizadas fotografias acerca do aspecto visual das amostras. Nesta parte, será realizada uma análise dos resultados obtidos. Após realizar os ensaios de imersão obtiveram-se alguns aspectos visuais na amostra que podem ser vistos a olho nu e os mais críticos que podem ser vistos por meio de análises microscópicas e por gráficos que facilitam a análise e entendimento das consequências geradas nas amostras.

4.1.1 Aspecto inicial das amostras dia 02/07/2024

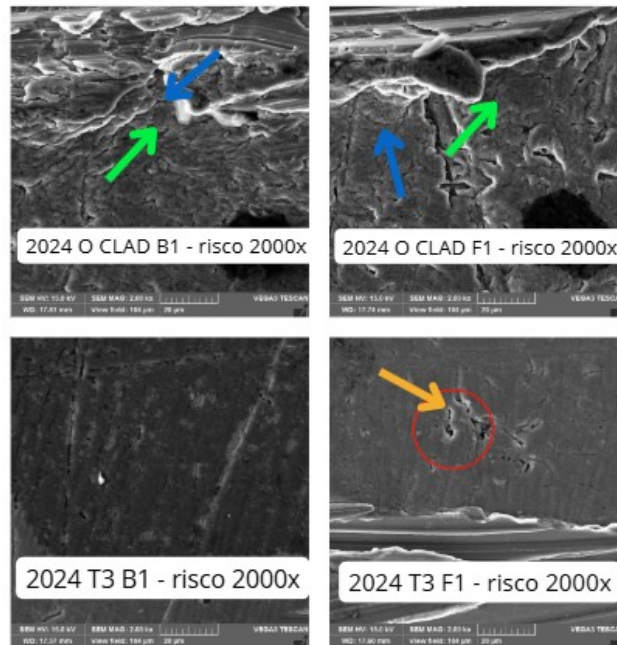
Todas as amostras foram observadas microscópicamente após a primeira imersão realizada no dia 02/07/2024. As figuras de 9 a 12 mostram o comportamento das ligas de alumínio.

Figura 9 – Análise das ligas de alumínio: (a) 2024 O CLAD B1 2000x; (b) 2024 O CLAD F1 2000x; (c) 2024 T3 B1 2000x; (d) 2024 T3 F1 2000x.



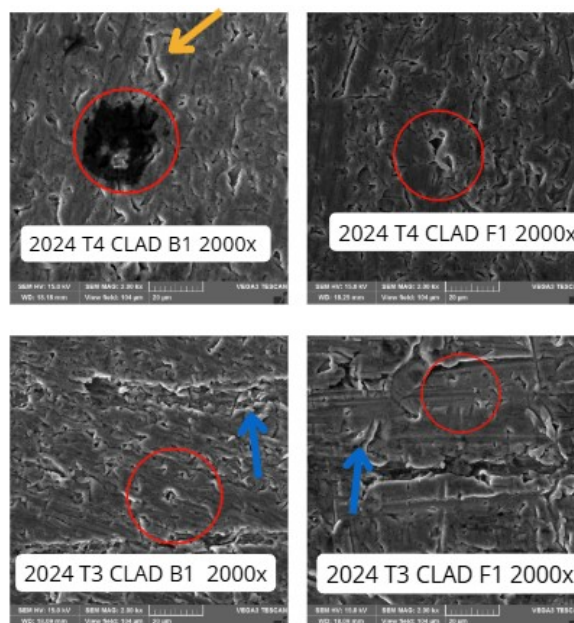
Fonte: Autores (2024).

Figura 10 – Análise das ligas de alumínio: (a) 2024 O CLAD B1 - risco 2000x; (b) 2024 O CLAD F1 - risco 2000x; (c) 2024 T3 B1 risco - 2000x; (d) 2024 T3 F1 - risco 2000x;



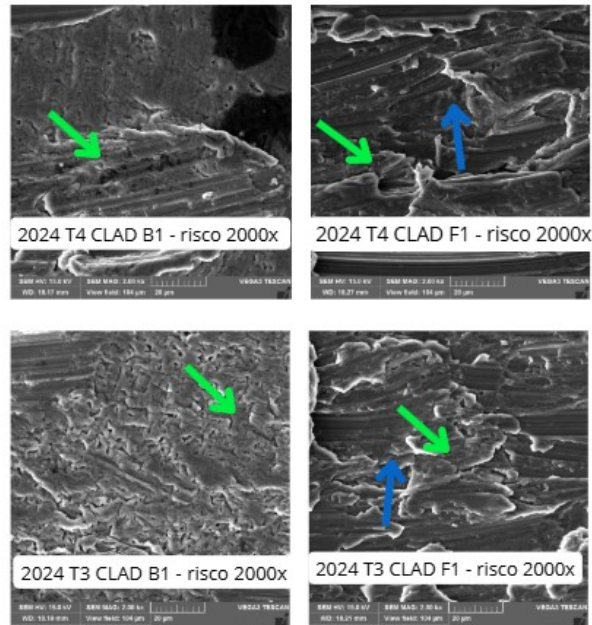
Fonte: Autores (2024).

Figura 11 – Análise das ligas de alumínio: (a) 2024 T4 CLAD B1 2000x; (b) 2024 T4 CLAD F1 2000x; (c) 2024 T3 CLAD B1 2000X; (d) 2024 T3 CLAD F1 2000x.



Fonte: Autores (2024).

Figura 12 – Análise das ligas de alumínio: (a) 2024 T4 CLAD B1 - risco 2000x; (b) 2024 T4 CLAD F1 - risco 2000x; (c) 2024 T3 CLAD B1 - risco 2000x; (d) 2024 T3 CLAD F1 - risco 2000x.

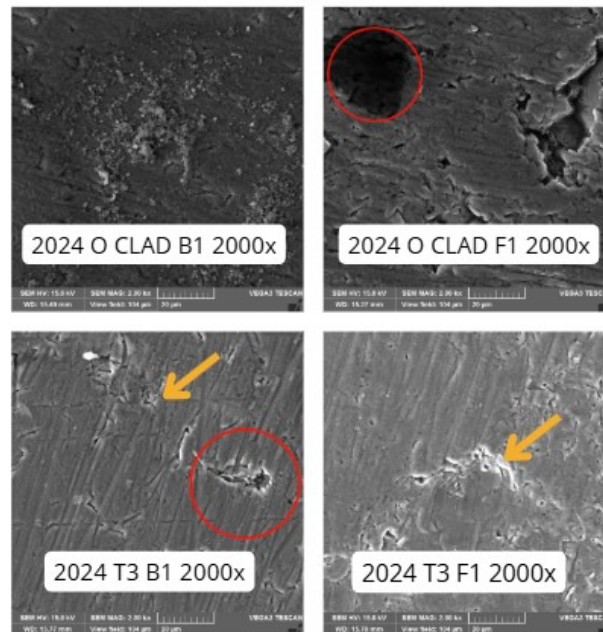


Fonte: Autores (2024).

4.1.2 Aspecto inicial das amostras dia 05/09/2024

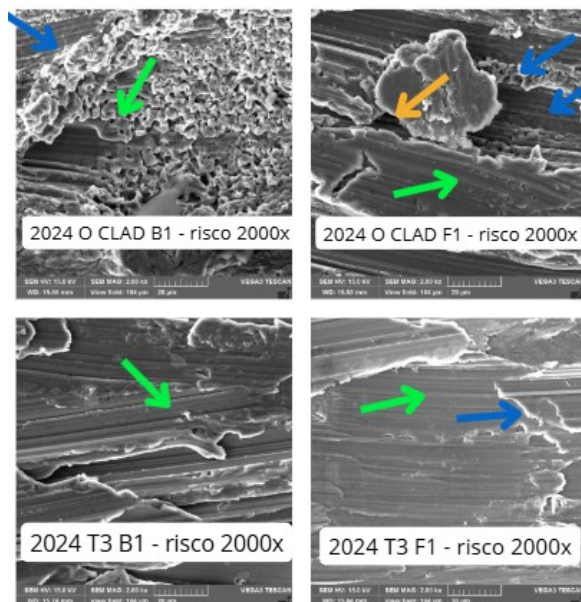
Após a realização da segunda imersão no dia 06/08/2024 as amostras foram observadas microscopicamente, no dia 05/09/2024 para identificar e estudar a corrosão, pois elas muitas vezes afeta a estrutura dos materiais em níveis muito pequenos e localizados, que não podem ser observados a olho nu. As figuras de 13 a 16 mostram o comportamento das ligas de alumínio.

Figura 13 – Análise das ligas de alumínio: (a) 2024 O CLAD B1 2000x; (b) 2024 O CLAD F1 2000x; (c) 2024 T3 B1 2000x; (d) 2024 T3 F1 2000x.



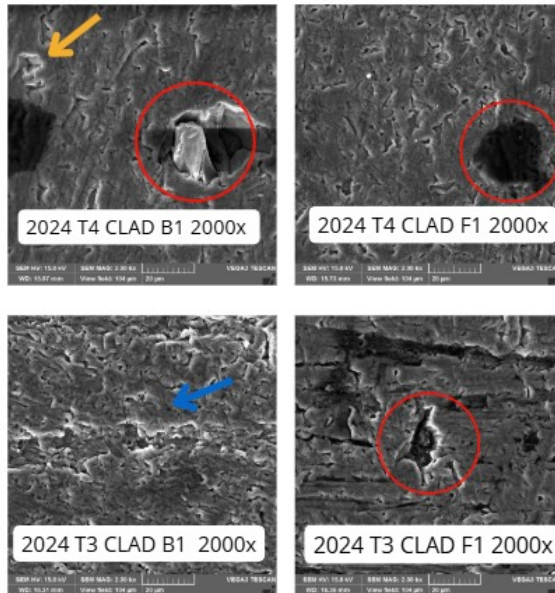
Fonte: Autores (2024).

Figura 14 – Análise das ligas de alumínio: (a) 2024 O CLAD B1 - risco 2000x; (b) 2024 O CLAD F1 - risco 2000x; (c) 2024 T3 B1 risco - 2000x; (d) 2024 T3 F1 - risco 2000x;



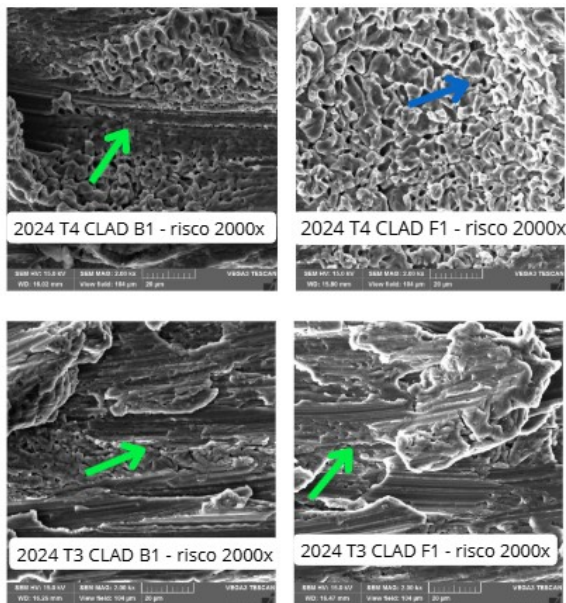
Fonte: Autores (2024).

Figura 15 – Análise das ligas de alumínio: (a) 2024 T4 CLAD B1 2000x; (b) 2024 T4 CLAD F1 2000x; (c) 2024 T3 CLAD B1 2000X; (d) 2024 T3 CLAD F1 2000x.



Fonte: Autores (2024).

Figura 16 – Análise das ligas de alumínio: (a) 2024 T4 CLAD B1 - risco 2000x; (b) 2024 T4 CLAD F1 - risco 2000x; (c) 2024 T3 CLAD B1 - risco 2000x; (d) 2024 T3 CLAD F1 - risco 2000x.



Fonte: Autores (2024).

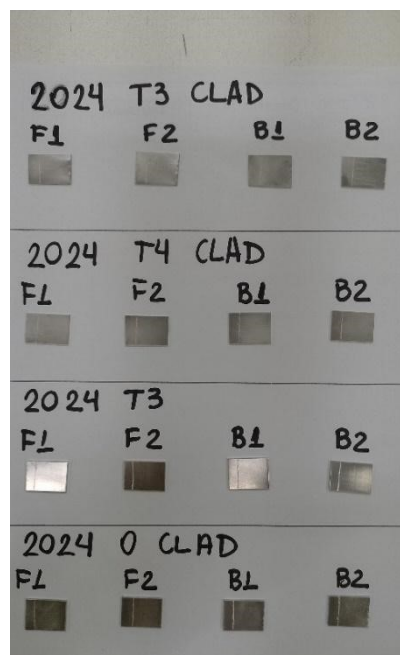
Na Figura 17 nota-se que as ligas foram corroídas, porém as imagens não

apresentaram grandes locais de corrosão, pois não foi possível identificar grandes zonas porosas e descontínuas. Porém, nas áreas que ocorreram a corrosão, a análise microscópica de amostras corroídas revela três principais tipos de danos: **pites de corrosão, danos no cladding e fissuras.**

Os pites de corrosão são pequenos buracos que ocorrem em áreas expostas ou riscadas do material, afetando sua integridade, (identificado por círculos vermelhos). O dano no CALD ocorre quando o revestimento protetor é removido, expondo o material à corrosão intensificada (setas verdes). Já as fissuras podem resultar de tensões internas ou falhas no revestimento, permitindo que a corrosão se espalhe por áreas previamente protegidas. Esses danos interagem e aceleram a degradação do material, tornando a análise microscópica essencial para a detecção precoce e prevenção de falhas. Além disso, as regiões esbranquiçadas, podem ser a camada de óxido (identificada por setas azuis), a qual protege o metal de oxidações posteriores, e algumas regiões de contorno branco (identificada por setas amarelas) podendo representar o início de uma corrosão por pites. Não foi possível identificar variação significativa na área riscada da amostra.

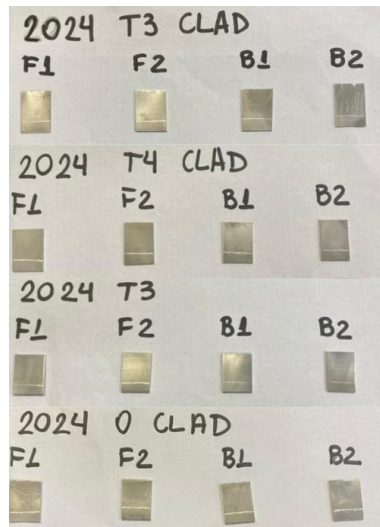
As figuras 17 e 18 a seguir mostram o aspecto visual das amostras, durante o processo de corrosão.

Figura 17 – Amostras após a imersão do dia 04/06/2024.



Fonte: Autores (2024).

Figura 18 – Amostra após última imersão 06/08/2024.



Fonte: Autores (2024).

A olho nú não é possível fazer uma análise consistente das amostras após imersão, situadas nas Figuras 17 e 18. Elas aparentam pouca corrosão e a área do risco em que pode haver rompimento do CLAD, não é possível identificar alterações significativas.

4.3 Resultados do teste de Imersão

O teste de imersão foi realizado para avaliar a resistência à corrosão da liga 2024, submersa em combustíveis JET A, por um período determinado. Os resultados mostraram o comportamento das ligas, verificando a ocorrência de corrosão. As medidas das amostras de Alumínio 2024 estão localizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Medidas das amostras de Alumínio da liga 2024

Medidas das amostras de Alumínio 2024				
Amostras	Dimensão (mm)	Área (mm ²)	Espessura (mm)	Massa (g)
2024 o clad (Bruto 1)	14,4 x 20,2	290,88	1,300	1,0060
2024 o clad (Bruto 2)	14,65 x 20,0	293	1,400	1,0250
2024 o clad (Filtrado 1)	14,7 x 20,0	294	1,300	1,0282
2024 o clad (Filtrado 2)	14,2 x 20,0	284	1,400	0,9915
2024 T3 clad (Bruto 1)	15,2 x 21,0	319,2	0,800	0,6934
2024 T3 clad (Bruto 2)	14,6 x 21,1	308,06	0,800	0,6809
2024 T3 clad (Filtrado 1)	14,5 x 20,8	301,6	0,800	0,6556
2024 T3 clad (Filtrado 2)	15,6 x 21,0	327,6	0,800	0,7095
2024 T3 (Bruto 1)	15,0 x 20,2	303	1,200	1,0371
2024 T3 (Bruto 2)	14,3 x 20,4	291,72	1,200	1,0014
2024 T3 (Filtrado 1)	14,7 x 20,1	14,7*20,1	1,200	1,0185
2024 T3 (Filtrado 2)	14,0 x 20,3	284,2	1,200	0,9837
2024 T4 clad (Bruto 1)	15,0 x 20,8	312	1,000	0,8774
2024 T4 clad (Bruto 2)	15,4 x 20,6	317,24	1,000	0,8350
2024 T4 clad (Filtrado 1)	14,3 x 20,8	297,44	1,000	0,8392
2024 T4 clad (Filtrado 2)	14,5 x 21,4	310,3	1,000	0,8522

Fonte: Autores (2024).

As Tabela 6 e 7, mostram as informações das imersões dos dias 06/08/2024 e 05/09/2024 respectivamente.

Tabela 6 -Dados das amostras no dia 06/08/2024.

Teste de corrosão por imersão 06/08/2024 - Tempo de Imersão = 1509h.							
Amostras	Dimensão (mm)	Área (mm ²)	Espessura (mm)	Massa (g)	Densidade (g/mm ³)	Data	Hora (I)
2024 o clad (Bruto 1)	14,4 x 20,2	290,88	1,300	1,0064	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:22
2024 o clad (Bruto 2)	14,65 x 20,0	293	1,400	1,0249	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:23
2024 o clad (Filtrado 1)	14,7 x 20,0	294	1,300	1,0281	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:33
2024 o clad (Filtrado 2)	14,2 x 20,0	284	1,400	0,9916	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:23
2024 T3 clad (Bruto 1)	15,2 x 21,0	319,2	0,800	0,6937	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:17
2024 T3 clad (Bruto 2)	14,6 x 21,1	308,06	0,800	0,6810	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:18
2024 T3 clad (Filtrado 1)	14,5 x 20,8	301,6	0,800	0,6556	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:18
2024 T3 clad (Filtrado 2)	15,6 x 21,0	327,6	0,800	0,7096	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:19
2024 T3 (Bruto 1)	15,0 x 20,2	303	1,200	1,0368	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:21
2024 T3 (Bruto 2)	14,3 x 20,4	291,72	1,200	1,0014	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:22
2024 T3 (Filtrado 1)	14,7 x 20,1	295,47	1,200	1,0183	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:21
2024 T3 (Filtrado 2)	14,0 x 20,3	284,2	1,200	0,9834	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:22
2024 T4 clad (Bruto 1)	15,0 x 20,8	312	1,000	0,8774	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:19
2024 T4 clad (Bruto 2)	15,4 x 20,6	317,24	1,000	0,8355	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:20
2024 T4 clad (Filtrado 1)	14,3 x 20,8	297,44	1,000	0,8391	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:20
2024 T4 clad (Filtrado 2)	14,5 x 21,4	310,3	1,000	0,8520	0.775-0.840 kg/L	8/6/2024	20:21

Fonte: Autores (2024).

Tabela 7 -Dados das amostras no dia 05/09/2024.

Teste de corrosão por imersão 05/09/2024 - Tempo de imersão = 719 h							
Amostras	Dimensão (mm)	Área (mm ²)	Espessura (mm)	Massa (g)	Densidade (g/mm ³)	Data	Hora ()
2024 o clad (Bruto 1)	14,4 x 20,2	290,88	1,300	1,0070	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:29
2024 o clad (Bruto 2)	14,65 x 20,0	293	1,400	1,0255	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:30
2024 o clad (Filtrado 1)	14,7 x 20,0	294	1,300	1,0284	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:28
2024 o clad (Filtrado 2)	14,2 x 20,0	284	1,400	0,9925	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:29
2024 T3 clad (Bruto 1)	15,2 x 21,0	319,2	0,800	0,6936	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:10
2024 T3 clad (Bruto 2)	14,6 x 21,1	308,06	0,800	0,6810	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:11
2024 T3 clad (Filtrado 1)	14,5 x 20,8	301,6	0,800	0,6556	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:10
2024 T3 clad (Filtrado 2)	15,6 x 21,0	327,6	0,800	0,7100	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:10
2024 T3 (Bruto 1)	15,0 x 20,2	303	1,200	1,0370	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:27
2024 T3 (Bruto 2)	14,3 x 20,4	291,72	1,200	1,0019	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:28
2024 T3 (Filtrado 1)	14,7 x 20,1	295,47	1,200	1,0192	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:26
2024 T3 (Filtrado 2)	14,0 x 20,3	284,2	1,200	0,9839	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:27
2024 T4 clad (Bruto 1)	15,0 x 20,8	312	1,000	0,8776	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:12
2024 T4 clad (Bruto 2)	15,4 x 20,6	317,24	1,000	0,8349	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:12
2024 T4 clad (Filtrado 1)	14,3 x 20,8	297,44	1,000	0,8390	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:11
2024 T4 clad (Filtrado 2)	14,5 x 21,4	310,3	1,000	0,8522	0.775-0.840 kg/L	9/5/2024	19:11

Fonte: Autores (2024).

Com os valores nas Tabelas, foi possível calcular a taxa de corrosão das amostras e sua perda ou ganho de massa. Para o cálculo da taxa de corrosão adotou-se a Equação 1 (ASTM G1-03-RZE):

$$Cr = (K * W) / (A * T * D)$$

Onde:

K= Constante milímetros por ano em mm/y ($8,76 * 10^4$);

T= Tempo de imersão em horas;

A= Área em cm²;

W= Perda de massa em gramas; e

D= Densidade em g/cm³

Os resultados obtidos para cada amostra podem ser observados na Tabela 8, o resultado das amostras 1 e 2 e a Tabela 9 mostra a média das amostras.

Tabela 8 -Taxa de corrosão das amostras.

Imersão - 2.228h	
Amostras	Taxa de Corrosão
2024 o clad (Bruto 1)	1,50E-07
2024 o clad (Bruto 2)	1,49E-07
2024 o clad (Filtrado 1)	7,40E-08
2024 o clad (Filtrado 2)	2,30E-07
2024 T3 clad (Bruto 1)	2,27E-08
2024 T3 clad (Bruto 2)	0,00E+00
2024 T3 clad (Filtrado 1)	0,00E+00
2024 T3 clad (Filtrado 2)	8,86E-08
2024 T3 (Bruto 1)	4,79E-08
2024 T3 (Bruto 2)	1,24E-07
2024 T3 (Filtrado 1)	2,21E-07
2024 T3 (Filtrado 2)	1,28E-07
2024 T4 clad (Bruto 1)	4,65E-08
2024 T4 clad (Bruto 2)	1,37E-07
2024 T4 clad (Filtrado 1)	2,44E-08
2024 T4 clad (Filtrado 2)	4,68E-08

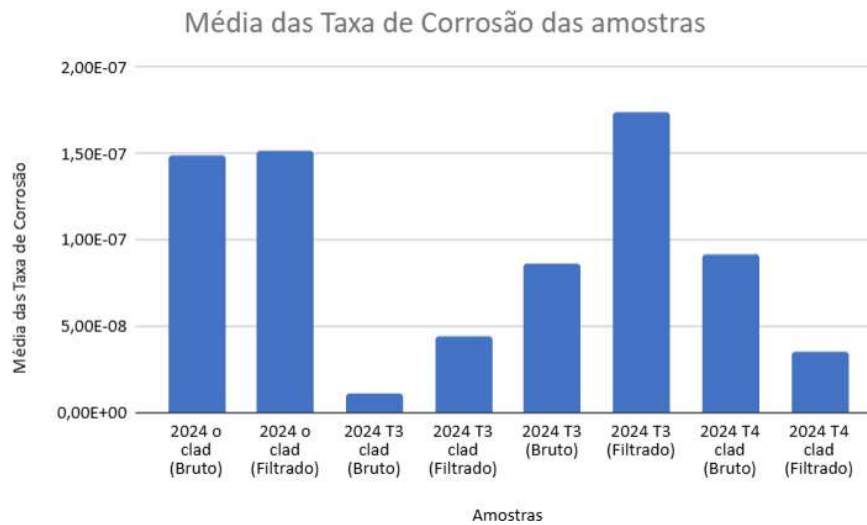
Fonte: Autores (2024).

Tabela 9 -Média da taxa de corrosão das amostras

Imersão - 06/08/2024 - 05/09/2024	
Amostras	Média das Taxa
2024 o clad (Bruto)	1,49E-07
2024 o clad (Filtrado)	1,52E-07
2024 T3 clad (Bruto)	1,14E-08
2024 T3 clad (Filtrado)	4,43E-08
2024 T3 (Bruto)	8,61E-08
2024 T3 (Filtrado)	1,74E-07
2024 T4 clad (Bruto)	9,19E-08
2024 T4 clad (Filtrado)	3,56E-08

Fonte: Autores (2024).

O Gráfico 1 mostra visualmente os resultados obtidos para cada amostra que estão na Tabela 8 e 9.

Gráfico 1 - Gráfico da Taxa de corrosão.

Fonte: Autores (2024).

Para um melhor entendimento, as ligas analisadas neste trabalho foram classificadas em uma lista de melhor desempenho à corrosão tendo como base os resultados obtidos nos cálculos da taxa de corrosão, a perda de massa, onde foi levado em consideração todas as análises feitas e a ordem foi disposta da melhor liga para a pior liga. Dessa forma, pode-se classificar as ligas de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Lista de Classificação de Desempenho das ligas.

Imersão - 06/08/2024 - 05/09/2024	
Amostras	Média das Taxa de Corrosão (mm/y)
2024 T3 clad (Bruto)	1° Lugar
2024 T4 clad (Filtrado)	2° Lugar
2024 T3 clad (Filtrado)	3° Lugar
2024 T3 (Bruto)	4° Lugar
2024 T4 clad (Bruto)	5° Lugar
2024 o clad (Bruto)	6° Lugar
2024 o clad (Filtrado)	7° Lugar
2024 T3 (Filtrado)	8° Lugar

Fonte: Autores (2024).

A Tabela 9 apresentou um resultado distante do esperado, uma vez que não houve um padrão de superioridade em relação ao desempenho das amostras imersas no combustível bruto em comparação com o combustível filtrado. Era esperado que as amostras imersas em combustível filtrado fossem superiores às amostras imersas

no combustível bruto. Isso pode ter se dado por conta de diversos fatores como, a exposição ao meio externo durante as imersões.

Após realizar todas as análises microscópicas e obter os resultados da taxa de corrosão calculada foi possível estudar e compreender o comportamento das ligas em estudo em relação à corrosão de imersão, dessa forma, é notório que o desempenho das ligas da série 2xxx é muito eficaz, uma vez que, a taxa de corrosão foi muito baixa e as imagens do MEV, apresentaram poucos focos de corrosão. A análise da tabela mostra que a **liga 2024 T3 Clad (Bruto)** apresenta a melhor resistência à corrosão, seguida pela **2024 T4 Clad (Filtrado)**. A camada **CLAD** é crucial para reduzir a corrosão, oferecendo uma boa proteção, especialmente quando combinada com os temperamentos T3 e T4. A **2024 T3 (Filtrado)** e a **2024 T4 Clad (Bruto)** ficam em posições intermediárias, com o temperamento T3 demonstrando melhor desempenho que o T4 na corrosão por imersão em JET-A1. As versões com **temperamento O**, tanto **Clad** quanto **Filtrado**, têm as maiores taxas de corrosão, especialmente a **2024 T3 (Filtrado)**, que ocupa o último lugar. Em resumo, a combinação do temperamento adequado e a camada CLAD são essenciais para minimizar a corrosão. No experimento a parte da amostra danificada e a filtragem de combustível ou não, não apresentou grande relevância para fins comparativos..

5. CONCLUSÃO

Neste relatório, foi conduzido um estudo acerca da liga de alumínio da série 2xxx, utilizadas na indústria aeronáutica. O foco deu-se na resistência das ligas de alumínio à corrosão. Foram escolhidas ligas com diversos tratamentos térmicos, como 2024 T3 CLAD, 2024 T4 CLAD, e 2024 T3 e 2024 O CLAD, para ensaios de corrosão de imersão no combustível aeronáutico JET-A. As análises morfológicas foram realizadas com microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar os efeitos da corrosão, incluindo fissuras, formação da camada passiva do alumínio e possível início de corrosão por pites.

Os resultados obtidos nos cálculos da taxa de corrosão, em relação a perda de massa, evidenciam que a liga 2024 T3 Clad (Bruto) apresenta a melhor resistência à corrosão, seguida pela 2024 T4 Clad (Filtrado), que indica a que a camada CLAD é indispensável para minimizar a corrosão. Além disso, foi constatado que a filtração do combustível não apresentou relevância a fim de comparação das amostras imersas.

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou diferenças significativas na microestrutura das ligas de alumínio da série 2xxx em condições de tratamento térmico e revestimento distintos. As amostras tratadas na condição T3 CLAD apresentaram a maior resistência devido à presença da camada de proteção e uma distribuição mais homogênea de precipitados na matriz metálica. Essa combinação possibilitou uma estabilidade estrutural e resistência à corrosão inicial mais elevadas, destacando-se como a opção mais resistente entre as avaliadas.

Durante os ensaios em combustível JET-A bruto e filtrado, foi possível verificar que o uso de filtro de carbono ativado reduziu significativamente a progressão da corrosão. As amostras imersas no combustível filtrado apresentaram menor perda de massa e menores taxas de corrosão, evidenciando a eficácia da remoção de contaminantes do combustível.

A análise das superfícies corroídas por MEV revelou diferenças significativas na morfologia entre as amostras. As amostras sem CLAD apresentaram corrosão mais severa, com formação de regiões profundamente atacadas e maior heterogeneidade superficial. Já as amostras com CLAD preservaram maior parte de sua integridade superficial, apresentando apenas danos localizados nas áreas previamente arranhadas, confirmando a importância da camada de proteção.

Considerando os resultados mecânicos e de resistência à corrosão, a condição ideal, é a da liga na T3 CLAD, imersa em combustível JET-A previamente filtrado com carbono ativado. Essa combinação proporciona uma relação otimizada entre resistência mecânica e resistência à

corrosão, tornando-a ideal para aplicações aeronáuticas sujeitas a ambientes agressivos e ciclos repetitivos de carga. O uso de combustível filtrado é essencial para prolongar a vida útil das ligas e reduzir custos associados à manutenção e substituição de componentes corroídos. O estudo contribuiu significativamente para o entendimento dos materiais empregados na indústria aeronáutica, sendo de grande relevância tanto para a prática profissional quanto para o desenvolvimento acadêmico na área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. **Proteção Catódica**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

DAVIS, J. R.; "Aluminum and Aluminum Alloys." Disponível em: <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf>. Acesso em 17/10/2024.

HATCH, John E.; "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy." Disponível em: <https://rayanmobadel.com/wp-content/uploads/2021/11/Aluminum-Properties-and-Physical-Metallurgy-by-John-E.-Hatch.pdf>. Acesso em 11/11/2024.

HANGAR MMA. **Como é o sistema de combustível do boeing 737?**. Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/como-e-o-sistema-de-combustivel-do-boeing-737/>. Acesso em: 20/05/2024.

HANGAR MMA. **Como ocorre a Corrosão Microbiológica em aeronaves?**. Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/corrosao-microbiologica/>. Acesso em: 03/04/2024.

HANGAR MMA. **Controle de Corrosão**. Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/wp-content/uploads/2019/05/CAPITULO-33-Corros%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 13/05/2024.

HANGAR MMA. **Corrosão Microbiológica**. Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/wp-content/uploads/2019/03/Corros%C3%A3o-microbiol%C3%B3gica.pdf>. Acesso em: 14/05/2024.

HANGAR MMA. **Tanques de combustível**. Disponível em: <https://hangarmma.com.br/glossary/glossary-categories/tanques-de-combustivel/>. Acesso em: 20/05/2024.

IPEN. **CORROSÃO INFLUENCIADA POR MICROORGANISMOS EM TANQUES DE COMBUSTÍVEL DE AERONAVES**. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_300/tc308-013.pdf. Acesso em: 13/05/2024.

PETROBRAS. **Manual de querosene de aviação**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/assistencia-tecnica>. Acesso em: 20/05/2024.

RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e Seu Controle**. São Paulo: Hemus, 1997.

UFERSA. **“ESTUDO DA CORROSÃO EM TANQUES DE COMBUSTÍVEL”**. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/a9e9a576-4166-4dfb-ac77-5714b77a09a9/content>. Acesso em: 13/05/2024.

UNITAU. **“CORROSÃO EM AERONAVES”**. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/187/1/TTEM003-14.pdf>. Acesso em: 13/05/2024.