

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA**

**ALISSON LEMOS DOS SANTOS**

**CORROSÃO INTERGRANULAR EM ESTRUTURAS DE ALUMÍNIO  
7050 UTILIZADO NA AVIAÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2014**

**ALISSON LEMOS DOS SANTOS**

**CORROSÃO INTERGRANULAR EM ESTRUTURAS DE ALUMÍNIO  
7050 UTILIZADO NA AVIAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao programa de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Bacharelado e Licenciatura em Engenharia Industrial Mecânica.

Orientadora: Prof. Dr(a). Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2014**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Cornélio Procopio

Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação de Engenharia Mecânica - COEME  
Engenharia Industrial Mecânica



## **TERMO DE APROVAÇÃO**


### **CORROSÃO INTERGRANULAR EM ESTRUTURAS DE ALUMÍNIO 7050 UTILIZADO NA AVIAÇÃO**

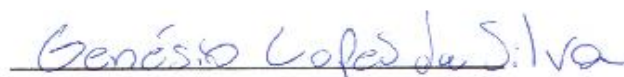
Por

**ALISSON LEMOS DOS SANTOS**

Este TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO foi apresentado em 28 de Julho de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

  
Janaina Fraçaro de Souza Gonçalves  
Profª Orientadora

  
Carlos Elias da Silva Junior  
Membro titular

  
Genésio Lopes da Silva  
Membro titular

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho somente pôde ser concluído com ajuda de diversas pessoas, às quais presto minha homenagem e meu respeito por todo auxílio.

À minha família que me apoiou durante toda minha jornada, em especial a minha mãe Neusa Lemos dos Santos.

Aos professores durante a graduação, em especial a minha orientadora professora Janaina Fracaro de Souza Gonçalves, pela orientação, paciência e atenção.

E principalmente a Deus por estar sempre presente em minha vida, dando-me força para vencer as minhas limitações.

“Ninguém é bom por acaso; a virtude deve ser bem aprendida”.

Chico Xavier

## RESUMO

Santos, Alisson. **CORROSÃO INTERGRANULAR EM ESTRUTURAS DE ALUMÍNIO 7050 UTILIZADO NA AVIAÇÃO**. 2014. 48 folhas. Trabalho de conclusão de curso, Bacharelado e Licenciatura em Engenharia Industrial Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Esta pesquisa apresenta uma abordagem prática do desenvolvimento da corrosão intergranular na liga de alumínio 7050-T7451 utilizada na construção de diversos componentes da estrutura de uma aeronave. De início é apresentado o que é este tipo de corrosão e como ela desenvolve-se na estrutura cristalina, observando quais as variáveis que compactuam com o agravamento desse problema e os seus impactos na aviação, já que é o estopim de uma série de defeitos estruturais, incluído a fadiga, que se sobressai ainda mais devido as circunstâncias que serão apresentadas. A realização dos ensaios em laboratório busca avaliar as reações do material quando exposto, por um grande período, ao fluido de corte e as variações térmicas, busca-se simular o desenvolvimento da corrosão na microestrutura, com esse intuito avaliou-se a perda de resistência mecânica nas amostras. Os resultados obtidos indicam que o fluido de corte, mesmo de forma lenta, apresentou efeitos na propagação da corrosão na liga de alumínio estudada e reduziu sua resistência mecânica.

**Palavras-chave:** Liga de Alumínio 7050-T7451. Corrosão Intergranular. Fluido de Corte. Resistência Mecânica.

## ABSTRACT

Santos, Alisson. **CORROSÃO INTERGRANULAR EM ESTRUTURAS DE ALUMÍNIO 7050 UTILIZADO NA AVIAÇÃO.** 2014. 48 folhas. Trabalho de conclusão de curso, Bacharelado e Licenciatura em Engenharia Industrial Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

This research presents a practical approach to the development of the intergranular corrosion in 7050 - T7451 aluminum alloy used in the construction of manifold components of an aircraft structure. At first, it is presented what type of corrosion this is and how it develops in the crystalline structure, noting which variables contribute to the aggravation of this problem and its impacts on aviation, since this is the beginning of a number of structural defects included fatigue, which stands out even more because of the circumstances that are presented. The performance of the tests in laboratory seeks to evaluate the reactions of the material when exposed to the cutting fluid and thermal variations for a long period, the development of corrosion in the microstructure has been simulated, and with this the loss of mechanical resistance of the samples could be evaluated. The results obtained indicate that the cutting fluid even slowly, showed effects in the propagation of corrosion in the alloy of aluminum studied and reduced your mechanical strength.

**Keywords:** 7050-T7451 Aluminum Alloy. Intergranular Corrosion. Cutting Fluid. Mechanical Resistance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Afinidade corrosiva.....	12
Figura 2 - Fratura frágil intergranular.....	13
Figura 3 - Corrosão intergranular em liga de alumínio .....	16
Figura 4 - Progressão das fissuras causadas pela fadiga.....	18
Figura 5 - Curva de análise de fadiga .....	19
Figura 6 - Selagem da fuselagem para a pressurização da aeronave .....	20
Figura 7 - Haste de descarregamento de energia estática de um Airbus A319 .....	21
Figura 8 - Reforço estrutural aplicado na fuselagem.....	22
Figura 9 - Fluxograma das etapas de preparação e análise das amostras.....	23
Figura 10 - Material para a preparação das amostras do ensaio metalográfico e de dureza .....	24
Figura 11 - Preparação e o corpo de prova pronto para o ensaio de tração .....	25
Figura 12 - Fluxograma com as etapas de preparação do ensaio de tração .....	26
Figura 13 - Corpos de prova imersos em fluido de corte.....	26
Figura 14 - Forno industrial utilizado no aquecimento das amostras .....	27
Figura 15 - Fluxograma da preparação para análise microscópica.....	27
Figura 16 - Máquina utilizada para realização de embutimento .....	28
Figura 17 - Amostras pós-polimento para análise microscópica .....	29
Figura 18 - Imagem microscópica com e sem aplicação de ácido fluorídrico (300X) .....	29
Figura 19 - Pontos de análise microscópica da amostra .....	30
Figura 20 - Máquina utilizada no ensaio de dureza e localização da medição.....	31
Figura 21 - Fluxograma do ensaio de tração.....	33
Figura 22 - Máquina utilizada para a realização do ensaio de tração .....	33
Figura 23 - Amostra sem exposição corrosiva (300X).....	34
Figura 24 - Contorno frontal (300X).....	35
Figura 25 - Contorno frontal das amostras imersas em fluido (380X) .....	36
Figura 26 - Imagens da superfície lateral das amostras (380X) .....	37
Figura 27 - Vista frontal de uma amostra íntegra (80X) .....	38
Figura 28 - Contorno dos grãos atacados pela corrosão (400X) .....	39
Figura 29 - Fotografia da amostra mais danificada (120X) .....	40
Figura 30 - Gráfico de comparação de dureza (HRB) .....	42



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da Liga de Alumínio 7050 - T745 .....	15
Tabela 2 - Resumo das análises microscópicas .....	41
Tabela 3 - Resultado do ensaio de dureza (HRB).....	41
Tabela 4 - Média da dureza de cada grupo de amostras .....	42
Tabela 5 - Resumo da análise de dureza.....	43
Tabela 6 - Dados resultantes dos ensaios de tração .....	44
Tabela 7 - Média dos valores adquiridos com o ensaio de tração .....	44
Tabela 8 - Conclusão do ensaio de tração .....	45

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>10</b>
2.1 DESCRIÇÃO DA CORROSÃO .....	10
2.2 TIPOS E CARACTERÍSTICAS DA CORROSÃO.....	11
2.3 CORROSÃO INTERGRANULAR EM ALUMÍNIO .....	14
2.4 ESTUDO DA FADIGA .....	17
2.5 CONDIÇÕES DE INTENCIFICAÇÃO DA CORROSÃO INTERGRANULAR ....	19
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>23</b>
3.1 FORMAS DE PREPARO E MÉTODOS DE ANÁLISE DOS ENSAIOS .....	23
3.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE DUREZA.....	31
3.3 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO .....	32
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
4.1 ANÁLISE DAS IMAGENS MICROSCÓPICAS DAS AMOSTRAS.....	34
4.1.1 Análise da Amostra Sem Exposição Corrosiva.....	34
4.1.2 Análise das Amostras que Sofreram Variações Térmicas.....	35
4.1.3 Análise das Amostras Expostas ao Fluido e a Variação Térmica.....	35
4.1.4 Análise Final das Amostras Observadas por Microscópio.....	38
4.2 ANÁLISE DE DUREZA.....	41
4.3 ANÁLISE DO ENSAIO DE TRAÇÃO .....	43
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na corrosão intergranular o grão é envolvido pelo processo corrosivo e vai perdendo gradativamente sua ligação com a matriz. A medida que o trabalho for se desenvolvendo será possível compreender como esse processo ocorre e as suas consequências dentro do material analisado.

O processo corrosivo ocorre lentamente dentro da estrutura e não é de fácil identificação, já que ocorre nos contornos dos grãos. Ele dissolve uma pequena massa nesses interstícios, para isso é necessário uma preparação adequada da amostra e um instrumento de visualização adequado como um microscópio para sua análise correta.

Este mecanismo analisado ocorre no material precipitado que se localiza justamente nas fronteiras dos grãos. Essa matéria nada mais é do que os elementos de liga como o Zinco, Magnésio, cobre e outros presentes em menor quantidade. O empobrecimento em cobre nesses espaços é um dos fatores principais no desenvolvimento da corrosão.

Dentro da área de enfoque, o que foi dito acima é fundamental para assimilar as ideias que serão abordadas. A liga de alumínio é amplamente utilizada e ainda é muito susceptível ao fenômeno da fadiga nas estruturas das aeronaves, ocasionado principalmente pela corrosão intergranular. Devido ao enfraquecimento no contorno do grão ocorre esse problema, que acaba gerando concentrações de tensões pela estrutura e enfraquece sua resistência, podendo levar a uma falha abaixo do seu limite de escoamento, pois a estrutura do avião está exposta a diversos tipos de esforços cíclicos. Conseguir aumentar o número de ciclos que ela poderá aguentar significará mais segurança e tempo entre as paradas de manutenção, resultando em uma maior vida útil.

Existem fatores que podem acelerar a corrosão intergranular, e o presente estudo aborda a influência do fluido de corte e das variações de temperatura neste fenômeno. Para analisar quais os efeitos reais neste tipo de liga e qual a porcentagem de perda de resistência mecânica que ele causa no material foram realizados ensaios demonstrando seu comportamento.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Os assuntos que serão abordados durante esta etapa são importantes para compreender os assuntos que se relacionam com a corrosão intergranular. É realizada uma revisão sobre o que é este tipo de corrosão e as variáveis que a envolvem quando inseridas na estrutura de uma aeronave.

### 2.1 DESCRIÇÃO DA CORROSÃO

De forma exemplificada, a corrosão ocorre devido à ação de um meio sobre um determinado material, causando sua deterioração, uma transformação no material, o que leva as propriedades físicas e químicas diferenciar-se das originais. Quando se fala neste assunto logo faz-se a associação com a ferrugem, muito comum em peças de ferro, onde se observa esfacelamento na superfície do material, desenvolvendo uma degradação superficial de fácil identificação. Mesmo sendo mais comumente observada em objetos metálicos, ocorre em diversos materiais, um exemplo é o concreto.

Na maioria das vezes o processo corrosivo acontece sem que perceba-se, mas ele está sempre presente direta ou indiretamente, pois pode ocorrer em estruturas metálicas, eletrodomésticos, automóveis, refinarias, tubulações, em navios, aviões e inúmeros outros exemplos.

É muito importante que se estude e entenda os mecanismos corrosivos, pois como já mencionado, tem grande impacto na vida cotidiana, economicamente ou como questão de segurança, pois o ser humano está cercado de mecanismos que estão sujeitos a este problema. Segurança em equipamentos, dando garantia e previsibilidade de falha, depende muito do controle, por isso esse trabalho vem abordar esse assunto, falando sobre seus impactos, esclarecendo e exemplificando seu desenvolvimento inicial.

Estima-se que uma parcela superior a 30% do aço produzido no mundo seja usada para reposição de peças e partes de equipamentos e instalações deterioradas pela corrosão (Nunes e Lobo, 1990).

Dito disso pode-se identificar a importância de discutir e pesquisar o assunto, a fim de buscar novas melhorias e sempre uma maior compreensão.

## 2.2 TIPOS E CARACTERÍSTICAS DA CORROSÃO

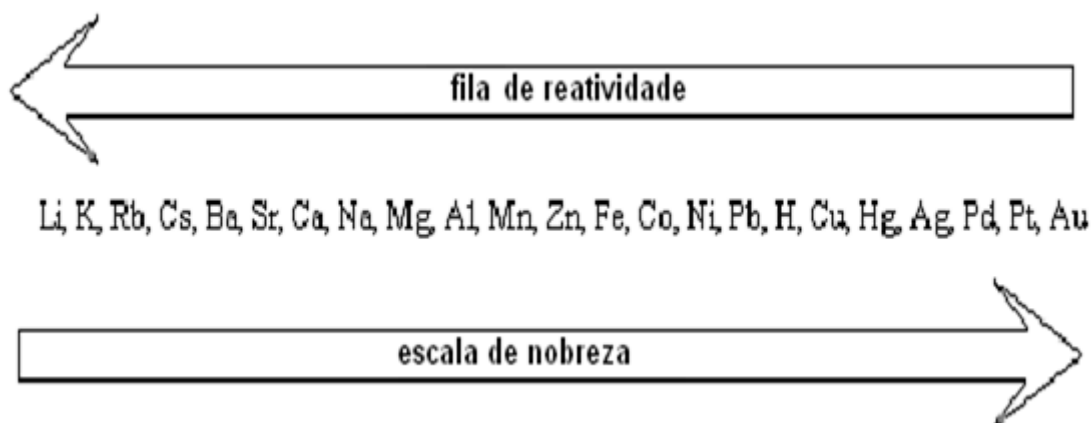
O dano causado nos materiais pode ser avaliado em ataque superficial, parcial, estrutural ou total do material, ocorrendo por três mecanismos distintos, ataque químico, físico ou eletroquímico. Com base no descrito pode-se classificar a corrosão em: eletrolítica, eletroquímica e química, a eletroquímica a responsável pela maioria dos processos ocorridos. (GENTIL, 2007)

Pode-se dividir a corrosão eletroquímica em processo anódico e catódico. No primeiro é a oxidação do metal com formação de íons locais de superfície, com característica de potencial mais ativo e em um setor menos nobre do material, com valor mais negativo. Esse processo ocorre nas regiões anódicas do metal.

Já o processo catódico é a recepção de elétrons pelos íons ou moléculas de solução com características de potencial menos ativo, mais nobre, com valor mais positivo. Esse processo ocorre em regiões catódicas (GENTIL, 2007).

No ânodo, onde ocorre a corrosão, átomos perdem um ou mais elétrons, oxidando, entram na solução sob a forma de cátions. As cargas negativas correspondentes, os elétrons, caminham do ânodo, por meio do condutor metálico para o cátodo, o metal protegido. Pode-se dizer que para a formação de uma pilha de corrosão são necessários os seguintes elementos: ânodo, cátodo, condutor e eletrólito.

Por meio de experiências com diversas soluções existentes, chegou-se às chamadas escalas de nobreza, demonstrada na figura 1, o que possibilita saber por que os navios utilizam peças de zinco para proteger seus cascos, proteção catódica por ânodo de sacrifício, que são de ferro.



**Figura 1 - Afinidade corrosiva**

**Fonte: Apostila de química Senai (2006)**

As principais formas de corrosão podem ser classificadas em dois grupos, macroscópica e microscópica.

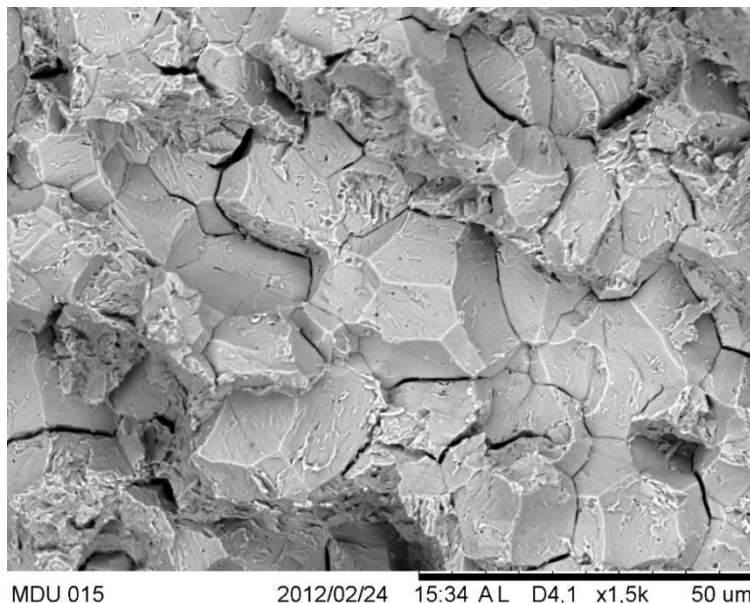
- Macroscópica: galvânica, erosão, corrosão em ranhuras, pitting, esfoliação e lixiviação seletiva.
- Microscópica: Intergranular, transgranular e corrosão sob tensão.

O enfoque será a corrosão microscópica, intergranular, que ocorre na forma de trincas, que vão se estendendo pelo interior dos grãos da rede cristalina do material, levando à perda de suas propriedades mecânicas.

A Corrosão sob tensão é a deterioração ocasionada por um conjunto de tensões mecânicas que podem ser aplicadas ou residuais em um ambiente corrosivo.

É definido como uma ação conjunta de uma tensão de tração e um meio corrosivo, provocando em alguns casos, a trinca do metal ou liga, ocorrendo comumente em metais dúcteis (Coutinho, 1992).

A corrosão intergranular, é encontrada nos grãos da estrutura cristalina do material, ocorrendo uma perda de propriedades mecânicas, levando o material a fraturar mesmo com esforços abaixo de sua resistência nominal, devido à aceleração da fadiga. Este tipo de problema leva a analisar o efeito sobre a estrutura de alumínio, utilizada em aeronaves, abordando sua influência no mecanismo de diminuição na resistência mecânica e o aumento da fadiga no material, conforme o ocorrido na figura 2.



**Figura 2 - Fratura frágil intergranular**  
**Fonte: Metalab análise de materiais (2012)**

Neste tipo de corrosão que ocorre entre os grãos, como é possível observar na figura 2, intercorre quando existe um caminho preferencial para o desenvolvimento corrosivo na região de contorno do grão, visualiza-se que os grãos vão separando-se, destacando à medida que a corrosão se propaga e rompendo de forma frágil. É importante salientar que entre os principais elementos responsáveis pela alternância de resistência à corrosão da matriz e do material vizinho ao contorno é a diferença na composição química nestes locais, o contorno é mais reativo que a matriz, esse contorno pode apresentar impurezas, enriquecimento ou empobrecimento de liga e precipitação de fases (Pimenta, 2007).

Neste sistema corrosivo ocorre um envolvimento do grão, que conseqüentemente irá perdendo a ligação com a matriz. Este mecanismo é gradativo e pode ter grande variação de velocidade, podendo ser muito lento, dependendo das variáveis agregadas ao material. Durante o progresso será desenvolvida uma dissolução de uma pequena massa, já que é feita uma análise microscópica, que pode ser considerada de grande escala, quando se considera os grãos envolvidos.

## 2.3 CORROSÃO INTERGRANULAR EM ALUMÍNIO

Quando fala-se em liga de alumínio, um dos adjetivos associados é de um material resistente à corrosão, que não “enferruja”, erroneamente é claro, na maioria das vezes é descrito assim pela sua alta capacidade de resistência, diferente dos metais ferrosos que degradam com o oxigênio presente no meio ambiente. O alumínio é um dos metais mais reagentes com oxigênio, acontecendo uma oxidação superficial em forma de película no próprio metal, o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

O substrato que se forma, de espessura bem fina, apenas 1nm, transforma-se em um isolador do oxigênio, o que o deixa extremamente resistente à corrosão. Esse substrato é de óxido de alumínio, substância resistente à ação da água e impermeável ao oxigênio, essa camada que não chega a ser visível é altamente protetora (ASKELAND, 2012).

Existem vários procedimentos para aumentar a resistência corrosiva, o acabamento de superfície é um deles, como a anodização e a pintura eletrostática a pó.

Por ter alta durabilidade e baixa densidade aliada com boa resistência mecânica, o alumínio é amplamente utilizado na indústria aeronáutica, já que é preciso aliar leveza com resistência. É necessário que o alumínio utilizado na estrutura da fuselagem dos aviões tenha essas qualidades, alie baixa densidade com alta resistência aos esforços gerados pelas condições de voo, fornecendo algo imprescindível na aviação, que é a segurança aliada com economia.

Para analisar a estrutura cristalina é preciso compreender o mecanismo da corrosão intergranular, o material estudado é uma liga de alumínio 7050 - T7451, com a composição descrita na tabela 1, onde se tem o predomínio de cobre, magnésio e zinco como elementos de liga. Somando-se todos os materiais adicionados tem-se uma média de 12%, ou seja, 88% da liga é alumínio puro.

É fundamental ter consciência da importância de cada componente da liga, para que se entenda como desencadeia a corrosão na microestrutura. O alumínio puro é altamente resistente à corrosão, mas é extremamente dúctil, possui baixo limite de resistência, devido a esse fator, são adicionados alguns elementos de liga, para melhorar as propriedades mecânicas. Quando se pensa na estrutura, pensa-se também que para lhe compor é necessário um material forte e leve, é para isso que diversos elementos são adicionados, para que alie às diversas qualidades do



alumínio também alto limite de resistência, tornando-o um material com excelentes propriedades mecânicas. É importante salientar que o tratamento térmico que esta liga sofre é importantíssimo para a estrutura final, ela passa por um duplo envelhecimento com alívio de tensão, o que a qualifica mais.

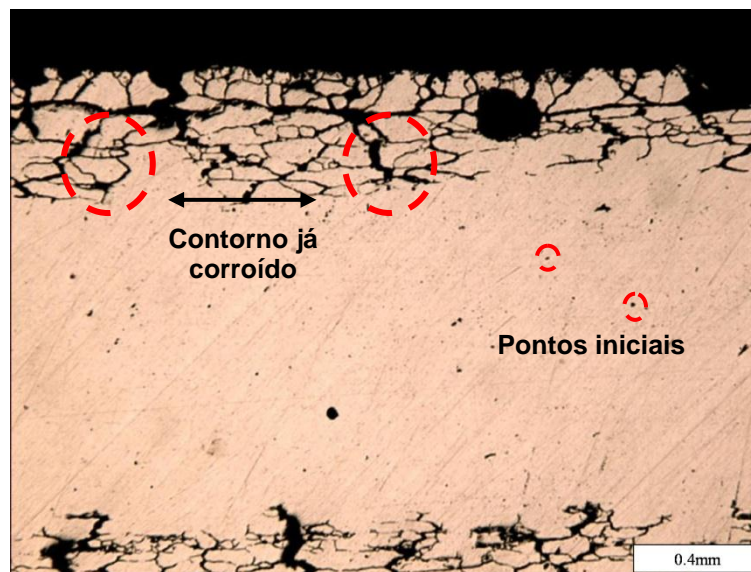
**Tabela 1 – Composição da Liga de Alumínio 7050 - T7451**

<b>Elemento</b>	<b>min</b>	<b>máx</b>
<b>Silício</b>	--	0.12
<b>Ferro</b>	--	0.15
<b>Cobre</b>	2.0	2.6
<b>Manganês</b>	--	0.10
<b>Magnésio</b>	1.9	2.6
<b>Cromo</b>	--	0.04
<b>Zinco</b>	5.7	6.7
<b>Titânio</b>	--	0.06
<b>Zircônio</b>	0.08	0.15
<b>Outros Elementos, cada</b>	--	0.05
<b>Outros elementos, total</b>	--	0.15
<b>Alumínio</b>	Restante	

**Fonte: AMS 4050H (2003)**

A liga de alumínio tem nos contornos dos grãos os precipitados, que são os elementos vistos na tabela 1, contendo esta liga o Zinco, Cobre e Magnésio como principais elementos de adição, são esses os causadores da corrosão intergranular.

Os precipitados que estão nas fronteiras, dividindo os grãos da matriz menos resistentes a corrosão, acarretam uma perda de resistência mecânica nestas regiões motivado pelo enfraquecimento das ligações, os grãos se separam, cria-se trincas microscópicas, como mostra a figura 3. Seu início é decorrente de pequenos pontos que ao desenrolar da corrosão se tornam fissuras mais representativas (Pimenta, 2007).



**Figura 3 - Corrosão intergranular em liga de alumínio**  
**Fonte: Clube Aeronáutico (2011)**

Essa segregação vai se propagando, podendo ser contínua ou não, e evoluindo lentamente dentro da estrutura, impossível de ser visualizada a olho nu. As fissuras seguem um padrão aleatório na região de fronteira entre os grãos, em algumas situações a corrosão pode contornar o grão e ficar restrita. Mas em muitas situações ela ataca regiões intermediárias dos grãos vizinhos e tende a se espalhar por toda a estrutura.

Segundo Frankel e Wolfe (2004) há possibilidade de uma fissura crescer a partir de um lado de uma lâmina de alumínio e atravessa-la completamente. Analisando milhares de simulações, foi descoberto que, até atingir o outro lado da amostra, uma fissura percorrerá uma trajetória que terá um comprimento de 4,29 vezes a espessura da lâmina. Quando submetem a experimentos reais de laboratório, os pesquisadores chegaram a um valor bem próximo de 4,25. O que determina o comprimento da fissura não é a direção que ela toma a partir de seu início, mas o que procede quando atinge uma interseção, no ponto onde se encontram as bordas de três grãos, nesses pontos a fenda pode continuar em um caminho reto, mudar de sentido e até mesmo saltar a interseção. Fissura com poucos saltos mostraram em estudos que ocasionam comprimentos pequenos, ou seja, espalham-se pouco pela liga. Com base no desenvolvimento dos estudos nesta área, no futuro será possível projetar microestruturas de matérias para

aumentar a possibilidades de saltos, essa tendência aumentará a resistência à corrosão intergranular.

As fendas formadas pela corrosão não necessitam de esforços externos, a fissuração decorre de um estreito caminho preferencial. Os mecanismos que às produzem estão associadas com esforços mecânicos, aplicados no material, são decorrentes de diversos processos de fabricação, como as tensões residuais, ou como consequência do próprio processo corrosivo, que desencadeia uma série de consequências à estrutura, que vai se acentuando com o nível de tempo e solicitação do material. A propagação relacionada à ocorrência de corrosão é, na maioria das vezes, muito lenta, dependendo de uma variação grande de tempo para atingir um tamanho considerável para poder ocorrer uma fratura repentina.

A estrutura de um avião está sujeita a muitos esforços, essas pequenas fendas originadas pela corrosão entre os grãos podem originar fissuras grandes, que levam a fraturas repentinas. É a difícil identificação e análise que torna importante o conhecimento do assunto e principalmente suas consequências, já que estamos falando de um material que é amplamente empregado na aviação, em grande parte da estrutura, portanto, é imprescindível confiança no material que será aplicado com tal finalidade. As avaliações devem ser constantes, observando a integridade estrutural, para prevenir possíveis imprevistos.

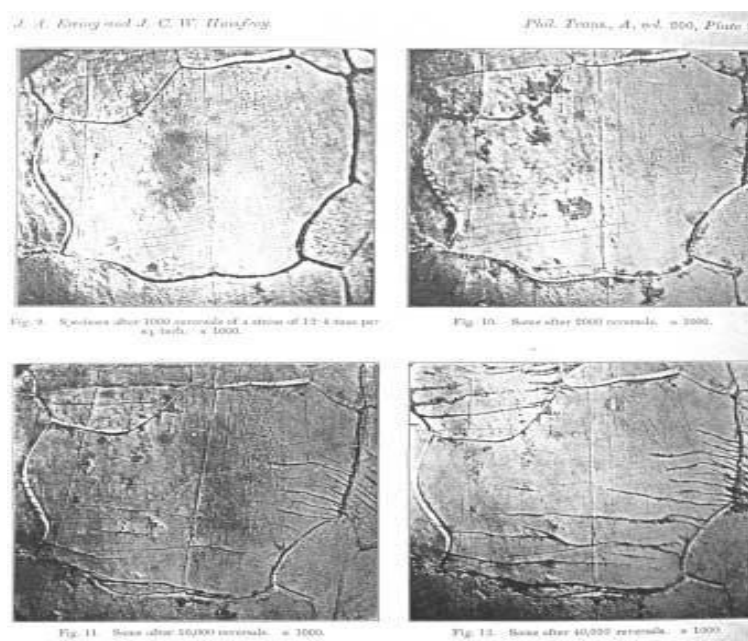
## 2.4 ESTUDO DA FADIGA

O processo corrosivo desencadeia problemas estruturais, o mecanismo começa com a corrosão que posteriormente com seu desenvolvimento levará a um aumento significativo na fadiga, o que pode levar a estrutura fraturar-se abaixo de seu limite de resistência, ou seja, romper entrando em colapso antes do esperado em projeto, com uma força menor que a admissível. O enfraquecimento entre os grãos diminui a força de ligação e levará a região a acumular tensões residuais, o que é muito importante no processo, pois diminui a resistência a fadiga, diminuindo os ciclos aos quais a estrutura pode ser exposta (MEYERS, 2009).

De acordo com ASHBY e JONES (2012), fadiga é o enfraquecimento do material causado por cargas aplicadas repetidamente. É um dano estrutural progressivo, lento e constantemente localizado, que ocorre quando um material é

sujeito a cargas cíclicas. Os valores de tensão máximos nominais que causam tais danos podem ser menores que a resistência do material, limite de ruptura ou o limite de elasticidade. Ocorre quando um material é submetido a uma carga e descarga repetida. Se as cargas estão acima de um limite, fissuras microscópicas começarão a formar concentradores de tensão, gerando deslizamentos nas interfaces dos grãos. Com o desenvolvimento uma rachadura que parte de um tamanho microscópico, pode atingir um tamanho crítico que se propaga de repente, trazendo a fratura do material.

O arranjo intergranular afeta significativamente a resistência à fadiga, o avanço da corrosão, e conseqüentemente o enfraquecimento nas regiões de contorno leva a um aumento nas tensões localizadas, onde fissuras provenientes da fadiga podem iniciar desenvolver-se, como visto na figura 4.



**Figura 4 - Progressão das fissuras causadas pela fadiga**  
**Fonte: Ewing & Humfrey (1903)**

Para analisar e visualizar o efeito da fadiga, é gerado um gráfico por meio de experimentação. Um ensaio realizado no material identifica a perda de resistência com o aumento de ciclos expostos, elucidando o que foi dito antes, a figura 5 exemplifica isto, ela traz tensão versus número de ciclos.



**Figura 5 - Curva de análise de fadiga**  
**Fonte: Forum performance boats (2009)**

## 2.5 CONDIÇÕES DE INTENCIFICAÇÃO DA CORROSÃO INTERGRANULAR

São várias as consequências geradas pela corrosão intergranular, ela desencadeia uma série de problemas dentro da estrutura principal da aeronave chamada de “charuto”, como mostra a figura 6. O alumínio está presente em inúmeras partes de um avião e nesta região terá grande importância, tendo em vista que é esta a estrutura principal, compreender quais esforços mecânicos uma aeronave sofrerá, fator primordial para o desenvolvimento de projetos aeronáuticos. É preciso compreender as condições de voo que a aeronave será exposta, dessa forma será possível garantir segurança e previsibilidade.

Durante o voo a aeronave será exigida a variações bruscas de temperatura, podendo sair de temperaturas quentes em solo e chegar aos 60 graus Celsius negativos em grandes altitudes, o que acaba amplificando a fadiga térmica o que leva a fragilização estrutural, que mesmo ocorrendo de forma muito lenta, não pode ser desprezada devido a grande necessidade de segurança que o aparelho demanda, por isto o monitoramento por meio de manutenções preditivas deve ser constante.

A pressurização é outro fator importante, influencia bastante nos esforços mecânicos no corpo principal do avião, o “charuto”. Ela foi uma das soluções encontradas para voar em grandes altitudes é uma maneira de reunir o ar, comprimir e direcioná-lo para o interior da cabine, reconstituindo as condições em terra, que é alta pressão com temperatura confortável e boa quantidade de oxigênio (JUNIOR, 2013).

Pressurizar o ar externo e inseri-lo dentro da fuselagem selada recria uma atmosfera semelhante à da crosta terrestre e conseqüentemente gera conseqüências estruturais. Os constantes pousos e decolagens geram essas tensões, que vão variar de acordo com os ciclos de voos, os domésticos são mais prejudiciais neste aspecto, eles requerem maior número de ciclos em um período menor de tempo. Neste sentido, aeronaves dedicadas a pequenas distâncias requerem prioridade de inspeção. Evidenciando que este é mais um fator que se soma para contribuir com a fadiga ocasionada pela pressurização, e porque o monitoramento da estrutura é feito pelos ciclos de voo, e não pelas horas de operação.



**Figura 6 - Selagem da fuselagem para a pressurização da aeronave**

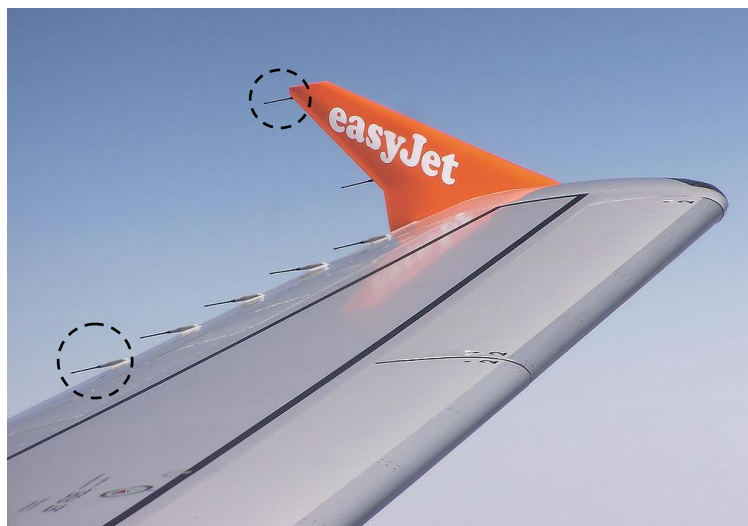
**Fonte: Raphael Benecase (2013)**

É importante citar o ambiente de exposição pelo qual as aeronaves passam, pode ser bastante úmido, salino e com várias outras substâncias que contribuem com a corrosão, incluindo a insolação motivada pelos raios ultravioleta que

deterioram as películas de tintas, algo bastante prejudicial e interessante de ressaltar, pois é um fator que pode acelerar a corrosão.

Um agravante aos aviões que frequentam aeroportos próximos às regiões litorâneas, pois ficam mais expostos aos sais em solução. Conforme o avião desce, a umidade aumenta, o ar entra em contato com a aeronave que está com temperatura abaixo da sua e ocorre a condensação, a água condensada em regiões próximas ao mar se torna mais agressiva e danosa.

Outro fator que pode-se observar é a carga estática que ocorre por causa do atrito com o ar, devido ao contato com nuvens carregadas eletricamente e motivado também por outros fatores. Existe um meio de descarregar esta energia durante o voo e que tende a acumular-se nas extremidades, como nas asas e superfícies da cauda. A finalidade dos pavios estáticos (*static wick*), mostrados na figura 7, é fornecer um caminho condutor para estes elétrons em excesso na aeronave de volta para a atmosfera, esta transferência reduz o acúmulo na superfície do avião e expõe o material a uma transição de elétrons que pode influenciar no processo corrosivo intergranular, este fluxo ocorre principalmente por regiões próximas às paredes externas das superfícies.



**Figura 7 - Haste de descarregamento de energia estática de um Airbus A319**

**Fonte: Aerospaceweb (2012)**

Depois de compreender algumas situações a que os aviões são expostos, como as ocasionados por pousos, variações de aceleração, turbulências,

pressurização e despressurização, manobras, variações de temperatura, variações de carga, entre outros, chega-se ao desencadeamento final, pois se não controlar a corrosão intergranular ela acaba desencadeando vários outros problemas e como consequência, fragiliza-se a estrutura da aeronave. A perda de ligação entre os grãos permite que esforços constantes fragilizem por meio da fadiga, mesmo que lentamente, o alumínio empregado na estrutura.

Quando a região de contorno sofre variações, permite que trincas microestruturais se desenvolvam por locais distintos, podendo ser contínua ou fragmentada. Esses defeitos aceleram a fadiga e demandam acompanhamento constante, para que não se tenha nenhuma falha inesperada, quando identificado algum dano inicial por intermédio de Raios X, teste ultrassônico ou outro método, são tomadas medidas de contenção, como a apresentada na figura 8, onde está sendo implantado um reforço estrutural em uma região afetada.



**Figura 8 - Reforço estrutural aplicado na fuselagem**  
**Fonte: Mecânica de aeronaves, Thiago Winkler (2013)**



### 3 METODOLOGIA

A metodologia descreve as etapas necessárias para a realização da pesquisa, detalhando as atividades realizadas para a construção dos resultados deste estudo. O desenvolvimento é descrito na ordem de realização das atividades, citando o “passo a passo”, de cada uma delas.

#### 3.1 FORMAS DE PREPARO E MÉTODOS DE ANÁLISE DOS ENSAIOS

A figura 9 exemplifica as fases de preparação para a realização do ensaio de dureza e a análise microscópica das amostras.

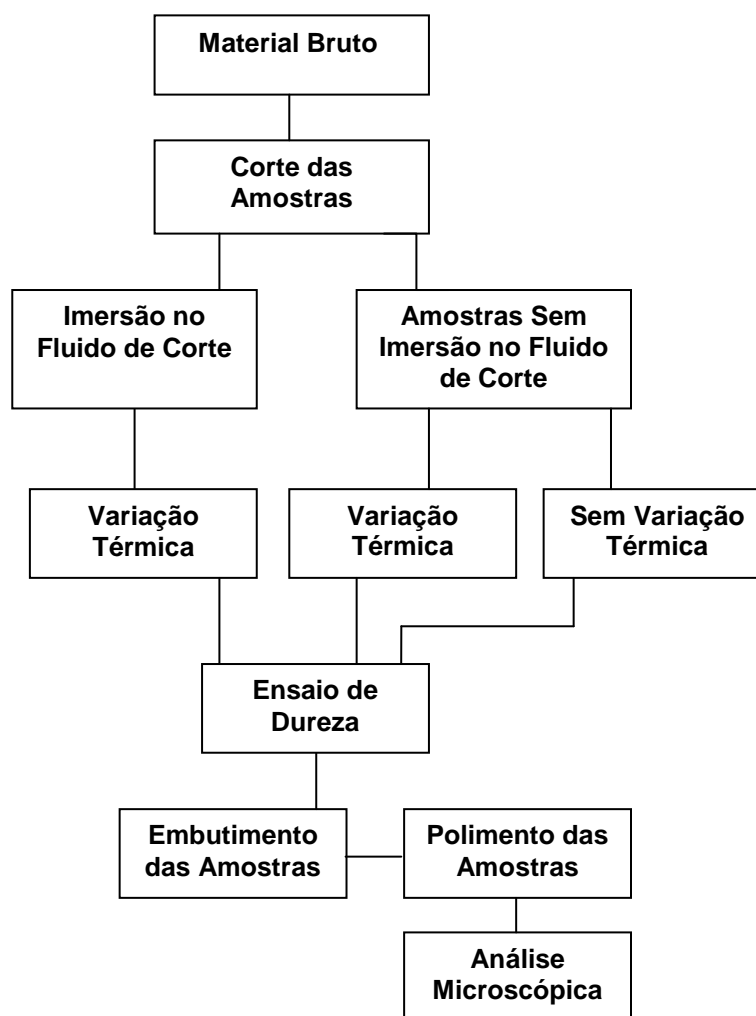


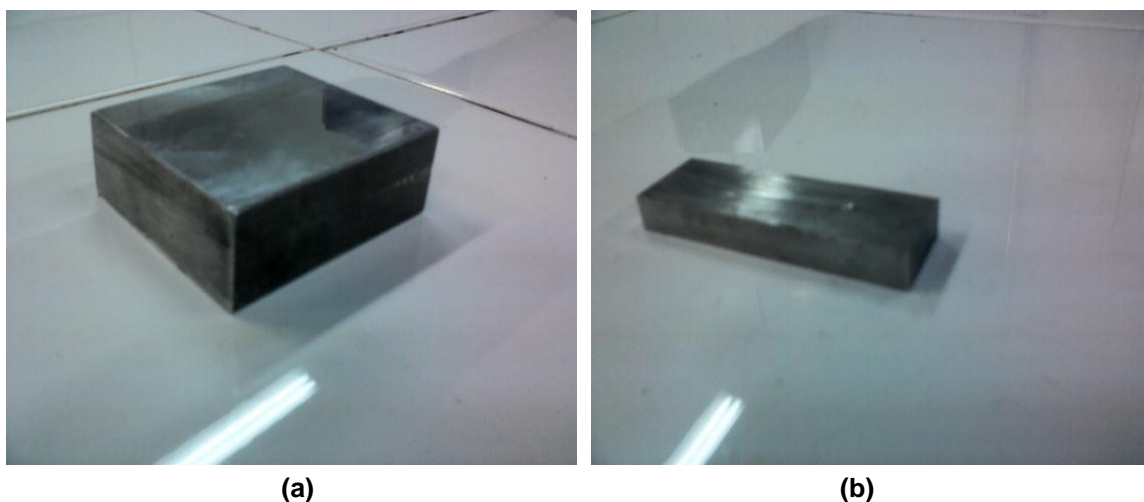
Figura 9 - Fluxograma das etapas de preparação e análise das amostras

Fonte: Autoria própria

O estudo vem abordar a consequência do fluido de corte no desenvolvimento da corrosão intergranular e analisar sua influência na redução da resistência mecânica no material.

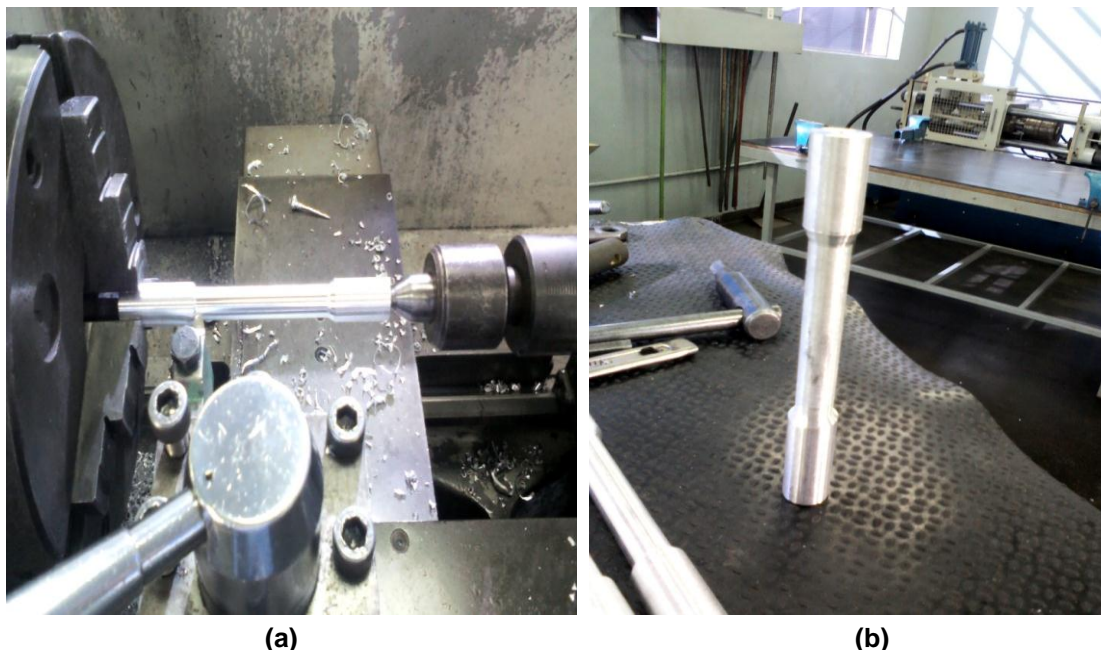
O material analisado foi a liga de alumínio 7050 – T7451, material tipicamente utilizado na fabricação de estruturas aeronáuticas. O corpo de prova utilizado foi obtido por usinagem, processo de fresamento em altas rotações de corte. Durante a sua usinagem foi utilizado fluido de corte solúvel para refrigeração do processo.

A primeira etapa foi para preparar os materiais para serem expostos as variações analisadas nesta pesquisa. A figura 10 mostra em (a) o material bruto e em (b) peças cortadas em partes retangulares.



**Figura 10 - Material para a preparação das amostras do ensaio metalográfico e de dureza**  
**Fonte: Autoria própria**

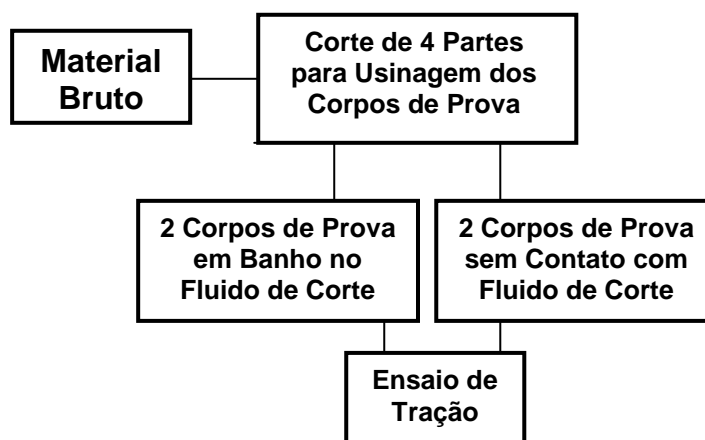
Foram preparados quatro corpos de provas segundo a norma ASTM E8M para ensaios de tração, dois foram deixados em banho com fluido de corte e os outros dois ficaram sem nenhum contato com fluido, assim foi possível fazer um comparativo de modo a analisar o comportamento na resistência mecânica.



**Figura 11 - Preparação e o corpo de prova pronto para o ensaio de tração**  
**Fonte: Autoria própria**

Foi utilizado um fluido solúvel de base vegetal, óleo de pinhão manso com concentração de 8% de óleo, as amostras retangulares da figura 10 ficaram 10 semanas imersas em fluido, dentro deste período, a cada 5 dias eram retiradas para secar a temperatura ambiente com duração de 48 horas.

O fluxograma da figura 12 mostra os passos para a realização do teste de tração.



**Figura 12 - Fluxograma com as etapas de preparação do ensaio de tração**

**Fonte: Autoria própria**

Os corpos de prova da figura 13, confeccionados para o teste de tração, ficaram duas semanas em banho no fluido de corte em temperatura ambiente. As amostras ficaram uma hora por dia fora do banho, expostas ao ar ambiente para que secassem e reagissem com o oxigênio.

O tempo que a amostra ficou fora do fluido de corte, teve como objetivo a reação com o ar ambiente. As retiradas permitiam a secagem e conseqüentemente a reação com o oxigênio.

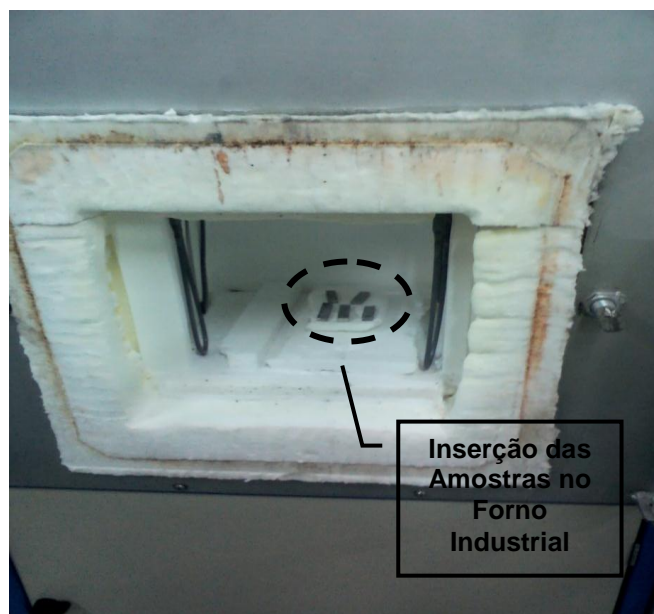
O tempo de imersão dos corpos de prova para o ensaio de tração ficou diferente das amostras retangulares devido ao atraso no cronograma, o atraso foi motivado pela dificuldade de obter esta liga de alumínio. Para que não prejudicasse o desenvolvimento da pesquisa, as amostras para o ensaio de tração ficaram um período menor em banho no fluido de corte.



**Figura 13 – Corpos de prova imersos em fluido de corte**  
**Fonte: Autoria própria**

As primeiras amostras, retangulares, foram feitas para realizar metalografia e ensaio de dureza. Ao fim do tempo de exposição no fluido de corte as três primeiras amostras foram colocadas juntas com mais duas amostras sem nenhuma exposição em um forno industrial com o objetivo de sofrer variações na temperatura, para serem comparadas as diferenças entre ambas às situações. As amostras permaneceram 10 minutos em uma temperatura de 100 graus Celsius e foram retiradas para temperatura ambiente até seu reequilíbrio térmico por 15 minutos,

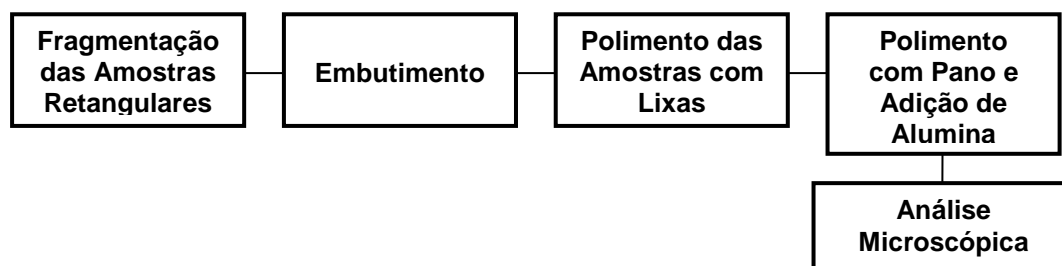
este ciclo foi repetido por 10 vezes. Foi utilizado o forno industrial com controle de temperatura Sanchis modelo N1100, do laboratório de materiais da UTFPR-CP, mostrado na figura 14. O objetivo foi avaliar a influência do parâmetro da temperatura no desenvolvimento da corrosão e conseqüentemente sua alteração na resistência superficial.



**Figura 14 - Forno industrial utilizado no aquecimento das amostras**

Fonte: Autoria própria

Depois de sofrer a variação térmica o próximo passo foi preparar as amostras para serem polidas e analisadas no microscópio. Foram utilizados dois microscópios, Dino-Lite modelo AM-413TL e Microscópio Metalográfico Invertido Opton TNM-07T-PL, com aumento de 80 à 400 vezes para obtenção das imagens apresentadas.



**Figura 15 - Fluxograma da preparação para análise microscópica**

Fonte: Autoria própria

Foram retirados fragmentos de cada amostra e realizado embutimento com baquelite, a máquina utilizado foi uma Struers Panamera, mostrada na figura 16. Em seguida as amostras foram polidas com lixas de granulações de 400, 600, 800, 1200 e 2000 centímetros quadrados e finalizadas com pano de polimento com adição de solução de alumina n° 2.



**Figura 16 - Máquina utilizada para realização do embutimento**

**Fonte: Autoria própria**

Após o polimento têm-se amostras prontas para as análises, a figura 17 apresenta como ficaram as amostras retangulares depois de serem cortadas em fragmentos, embutidas e polidas.

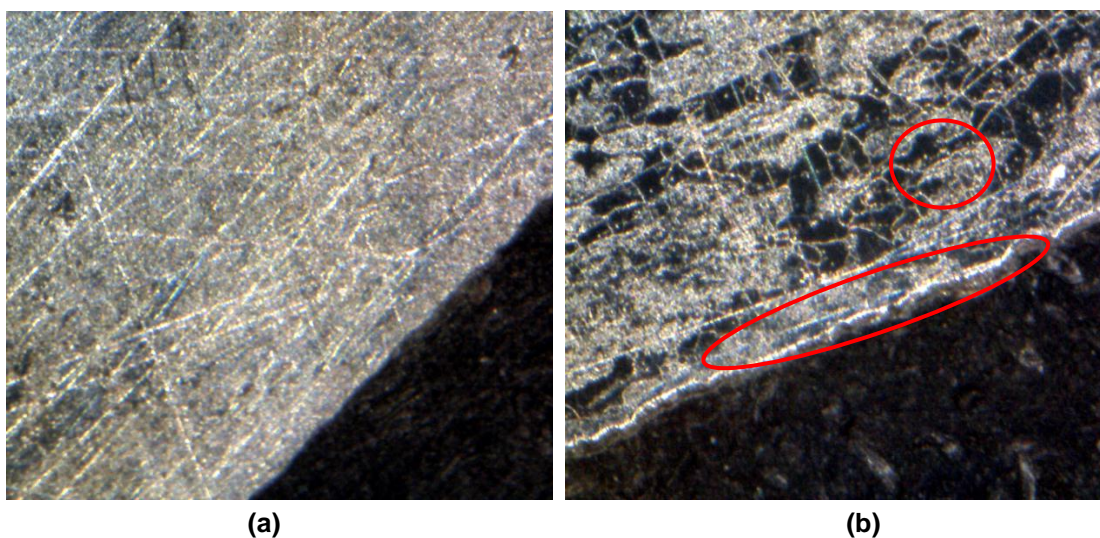


**Figura 17 - Amostras pós-polimento para análise microscópica**

**Fonte: Autoria própria**

Depois de finalizada a preparação, as amostras polidas foram submetidas a uma análise sem adição de ácido fluorídrico, que é indicado para metalografia em ligas de alumínio, para que não prejudicasse na identificação da evolução corrosiva.

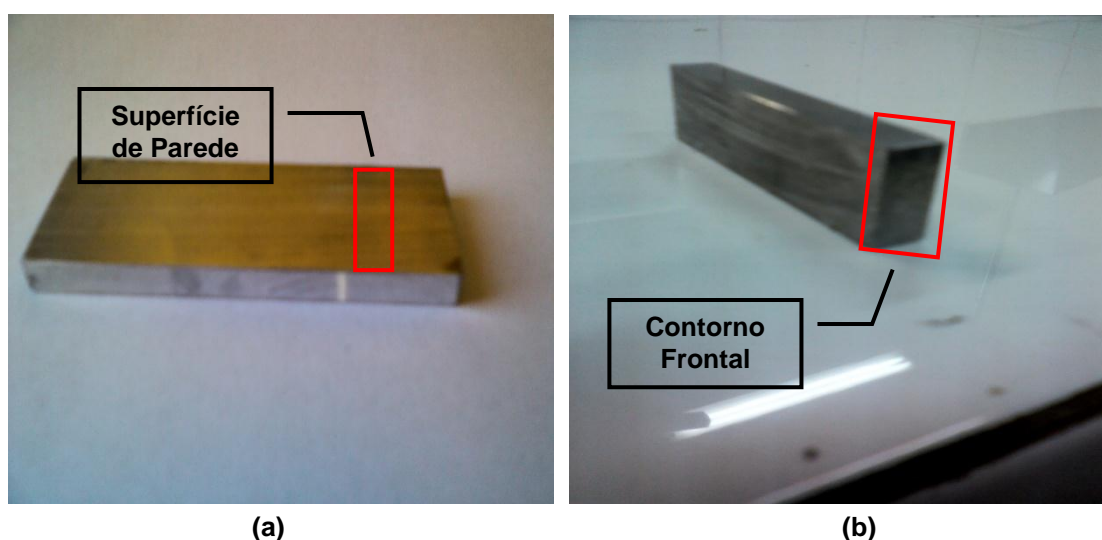
Comparando as diferenças presentes com e sem adição de ácido fluorídrico em cada amostra percebe-se a diferença de visualização. A figura 18 traz as duas situações, em (b) a adição do ácido acentuou a corrosão intergranular, por isso não foi utilizado.



**Figura 18 - Imagem microscópica com e sem aplicação de ácido fluorídrico (300 e 380X)**  
**Fonte: Autoria própria**

A localização dos pontos de análise da imagem foi definida em dois setores da amostra, os quais são mostrados na figura 19, ela apresenta esses dois pontos que foram selecionados para serem cortados e separados das amostras retangulares antes do embutimento.

Foram escolhidos esses dois setores para comparar à evolução da corrosão intergranular, a tendência é que ela seja mais intensa nas extremidades. Por isso a escolha desses pontos de análise. Avalia-se como a corrosão segue para o interior do corpo ensaiado observando o contorno frontal, região circulada na figura 19 (b). A região circulada em (a) é para ver a distribuição da corrosão pela superfície, como ocorre sua distribuição.



**Figura 19 - Pontos de análise microscópica da amostra**  
**Fonte: Autoria própria**

A superfície de parede em (a) e o contorno frontal em (b), ambas da figura 19, permite essa observação de desencadeamento corrosivo para que se possa comparar em dois pontos distintos de uma mesma amostra a distribuição da corrosão intergranular.



### 3.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza foi realizado de modo a avaliar o comportamento da resistência superficial das peças usinadas com e sem fluido de corte. Foram avaliados os valores de dureza em três pontos distintos da superfície de cada amostra, como indicado na figura 20 (b). Os três pontos de medição no mesmo corpo de prova servem para obter uma média confiável de dureza. Os valores destoam devido a variação da própria máquina e também pela variabilidade do próprio material.

- As três amostras submetidas ao fluido de corte e a variação térmica pertencem ao grupo de amostras número 1;
- Os dois corpos de prova que sofreram apenas variação térmica são o grupo de amostra número 2;
- O corpo de prova sem nenhuma influência de temperatura ou do fluido de corte foi utilizado para comparação com os outros grupos de amostras e recebeu a nomenclatura de grupo de amostra 1;

A figura 20 (a) mostra a máquina de ensaio utilizado para esse teste e a (b) os locais no corpo de prova onde foi realizado o teste de dureza.

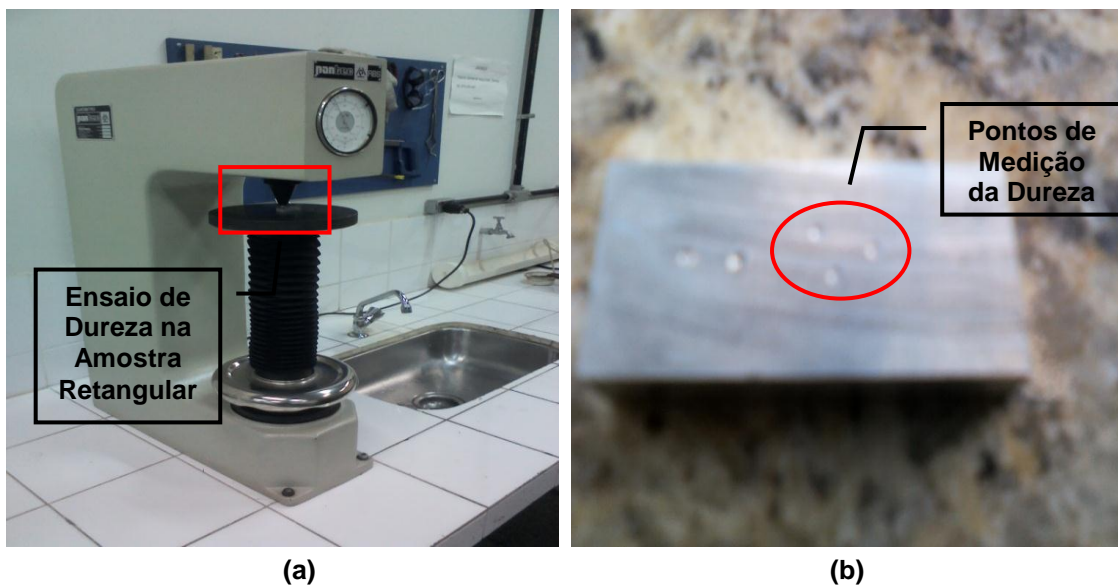


Figura 20 - Máquina utilizada no ensaio de dureza e localização da medição

Fonte: Autorial Própria

A máquina utilizada foi um Durômetro Pantec RBS - M, escala B vermelha, carga maior de 100, penetrador de aço 1,5875 mm e faixa de utilização de 20 á 100 HBR, disponível no laboratório de ensaios de materiais da UTFPR - CP.

### 3.3 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova foram usinados em torno mecânico, TORMAX 20 - ROMI, disponibilizado pelo SENAI - Londrina. Foram usinadas quatro amostras no total, duas foram dispostas em fluido de corte e as outras duas ficaram sem nenhuma exposição.

O equipamento de ensaio utilizado foi uma máquina universal de ensaio de tração TIME GROUP, modelo WDW – 100E, capacidade de 10000 Kgf de tração e compressão, mostrado na figura 22. Equipamento disponível no laboratório de materiais da UTFPR - CP.

Por meio do ensaio de tração é possível obter as propriedades mecânicas desta liga de alumínio 7050, antes e depois da imersão em fluido de corte. A análise dos resultados obtidos com as amostras ensaiadas permite adquirir o limite de resistência, elástico, de ruptura, alongamento e estrição. Com os dados retirados do ensaio de tração é realizada uma comparação entre a diferença de resistência mecânica dos corpos deixados em banho no fluido com os outros dois que não foram expostos.

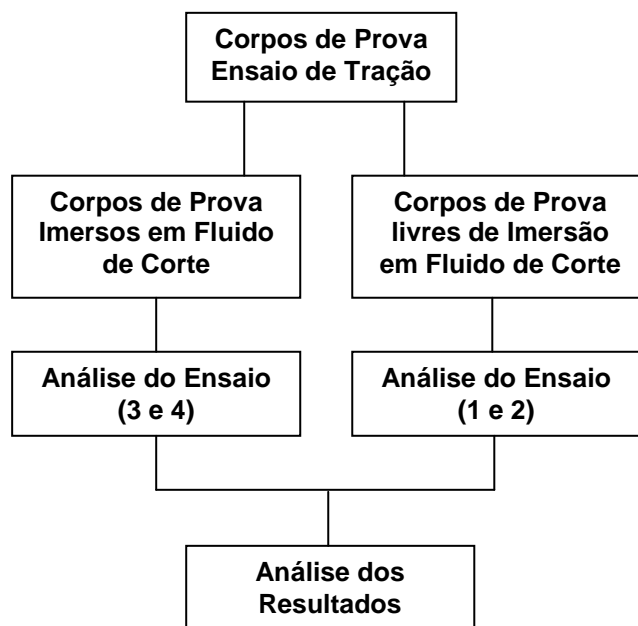


Figura 21 - Fluxograma do ensaio de tração  
Fonte: Autoria Própria



Figura 22 - Máquina utilizada para a realização do ensaio de tração  
Fonte: Autoria própria

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos subtópicos a seguir apresenta-se todos os resultados obtidos, interpretando todos os ensaios realizados.

### 4.1 ANÁLISE DAS IMAGENS MICROSCÓPICAS DAS AMOSTRAS

Nesta etapa são apresentadas as micrografias e também avaliado os danos na microestrutura, descrevendo suas possíveis causas.

#### 4.1.1 Análise da Amostra Sem Exposição Corrosiva

A figura 23 mostra em (a) uma vista do contorno frontal da amostra e em (b) a superfície de parede. Este material não sofreu nenhuma exposição ao fluido de corte ou variação térmica. Pode ser considerada sem defeitos gerados pela corrosão intergranular, e toma-se esta imagem como forma de análise comparativa com as próximas amostras que serão apresentadas, que sofreram exposição corrosiva.

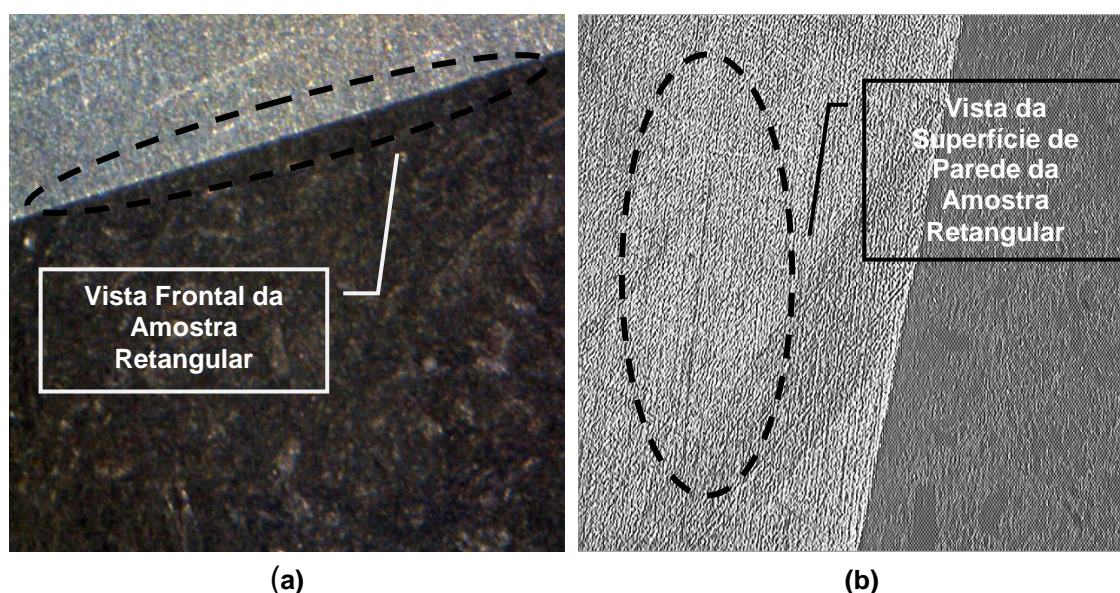


Figura 23 - Amostra sem exposição corrosiva (300 X)

Fonte: Autoria própria

#### 4.1.2 Análise das Amostras Submetidas às Variações Térmicas

A figura 24 apresenta as amostras que sofreram apenas variações de temperatura, mostra-se a vista do contorno frontal de duas amostras distintas. Essas imagens mostram uma pequena diferença quando comparadas com as imagens anteriores da figura 23, já se identifica alguns pontos brilhantes nas extremidades, mas com pouca invasão da corrosão para o interior da amostra.

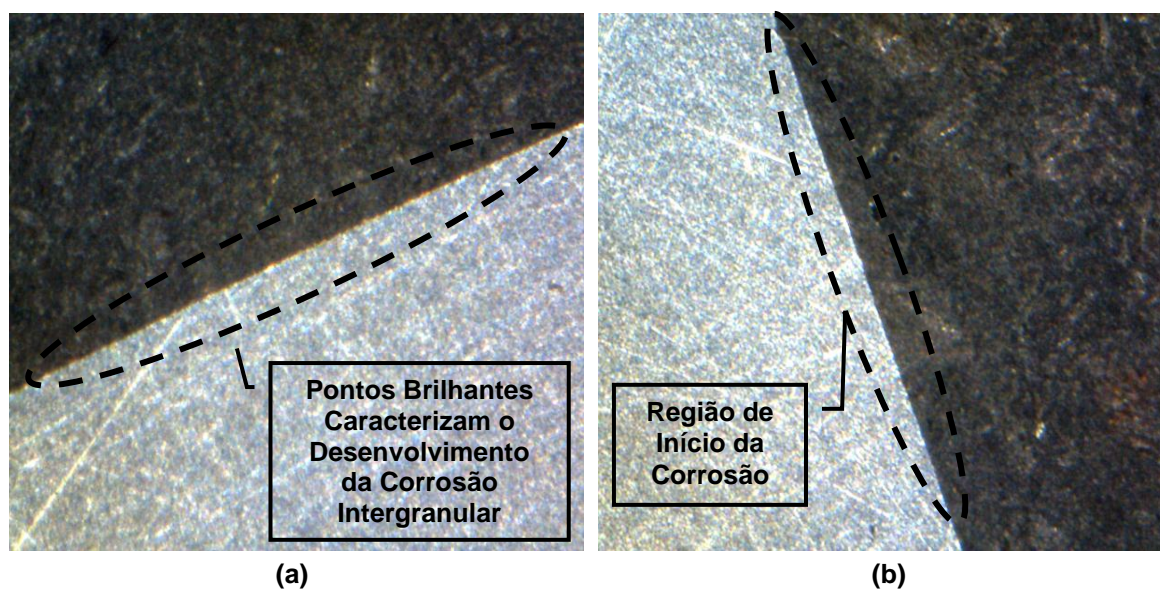
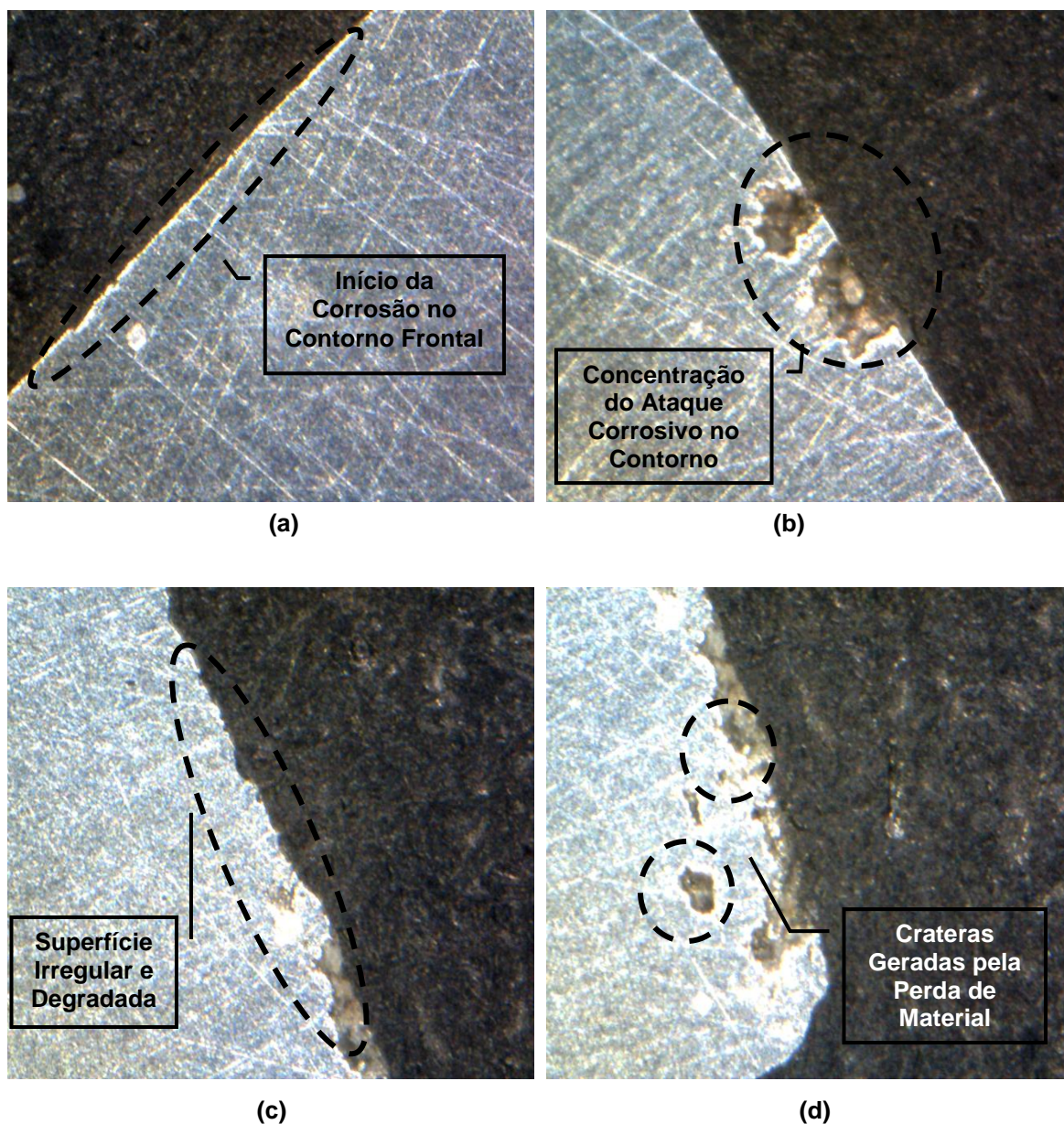


Figura 24 - Contorno frontal (300X)  
Fonte: Autoria própria

#### 4.1.3 Análise das Amostras Expostas ao Fluido e a Variação Térmica

A figura 25 mostra o contorno frontal das amostras sujeitas ao fluido de corte, por ela visualiza-se a ocorrência da corrosão para o interior do material sob condições idênticas de imersão ao fluido e a variações de temperatura.

Em todas as imagens apresentadas na figura 25 observam-se danos gerados pela corrosão intergranular, nas regiões demarcadas fica evidente o desenvolvimento da corrosão, levando as degradações nas seguintes visualizações.



**Figura 25 - Contorno frontal das amostras imersas em fluido (380X)**

Fonte: Autoria própria

É Possível identificar uma diferença significativa comparando as amostras das figuras 23 e 24, identifica-se uma degradação no entorno do material. Isso se dá pelo fator de perda de material nas regiões circuladas, percebe-se uma coloração mais brilhante e uma superfície irregular, além de muitos pontos degradados. Essa alteração é devida ao avanço da corrosão iniciada entre os grãos da estrutura, esse avanço levou a uma perda de ligação com a matriz, que durante o polimento, sofreu uma leve fragmentação, ou seja, o contorno do grão sofreu diminuição na força de ligação entre um grão e outro, levando a uma segregação dos que foram circunscritos pela corrosão. Analisando as figuras das amostras 23 e 24 não se

identifica essas características pelo fato de a ligação do material estar fortemente estabelecida em todas as regiões da estrutura em escala maior que as amostras degradadas.

Na figura 26 tem-se as mesmas amostras da figura 25, mas com pontos distintos de aproximação microscópica, agora é visualizado as regiões superficiais de parede, como circulado nas imagens abaixo.

No contorno das crateras circuladas percebe-se uma coloração brilhante, essa diferença na tonalidade pode significar o avanço corrosivo que é dado pelo enfraquecimento dos grãos do material, levando às crateras destacadas.

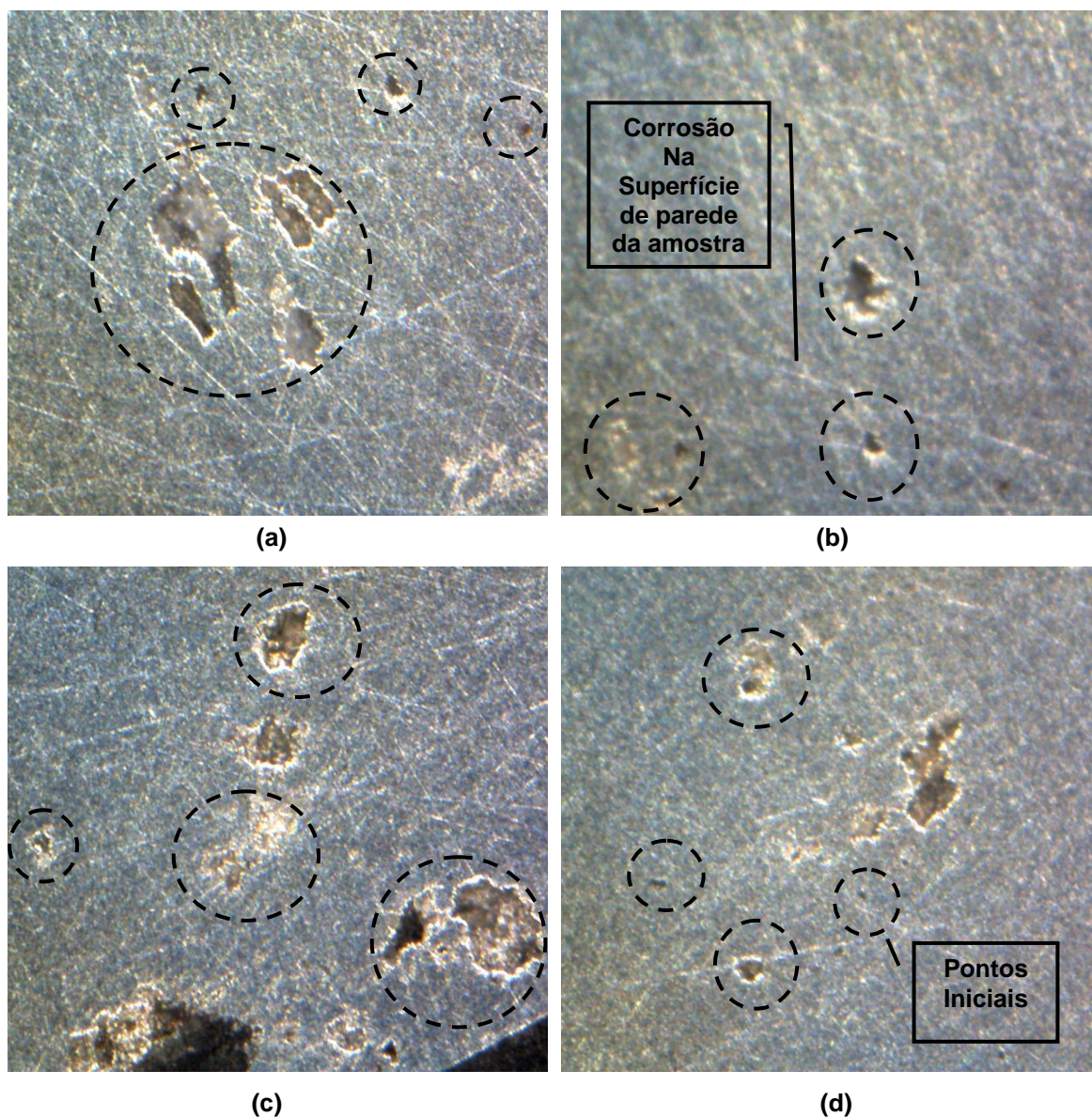


Figura 26 - Imagens da superfície lateral das amostras (380X)

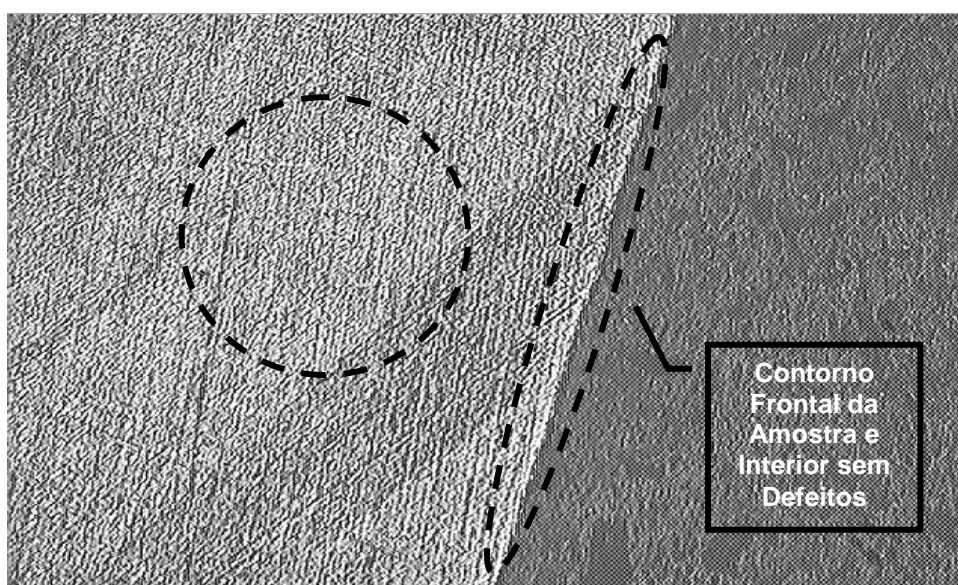
Fonte: Autoria própria

A visualização é esclarecedora e elucida o que já foi falado anteriormente, o procedimento de deterioração que ocorre em diferentes escalas na figura 26 alicerça a dizer que este tipo de corrosão ocorre com boa distribuição sobre a superfície do material. As imagens (b) e (d) da figura 26, apontam o início do desenvolvimento corrosivo, enquanto as (a) e (c) mostram um estágio já mais evoluído de deterioração. Ocorreu maior perda de material, como esta figura é uma imagem focalizada na parede da amostra, a observação da superfície é diferente da figura 25, que mostra a região frontal da amostra, focalizada no contorno.

Através das amostras analisadas o que é mais contundente é a fragilização superficial generalizada, fica claro que a corrosão conseguiu desenvolver-se no interior do material, pois, mesmo com o polimento retirando material da superfície, foram observados muitos pontos de corrosão distribuídos em uma nova camada superficial que surgiu.

#### 4.1.4 Análise Final das Amostras Observadas pelo Microscópio

As figuras a seguir esclarecem as principais diferenças entre cada tipo de amostra, comparando a figura 27, que mostra um material sem nenhuma exposição, do fluido de corte ou variações térmicas, com as figuras 28 e 29 que foram submetidas a esses dois fatores citados.



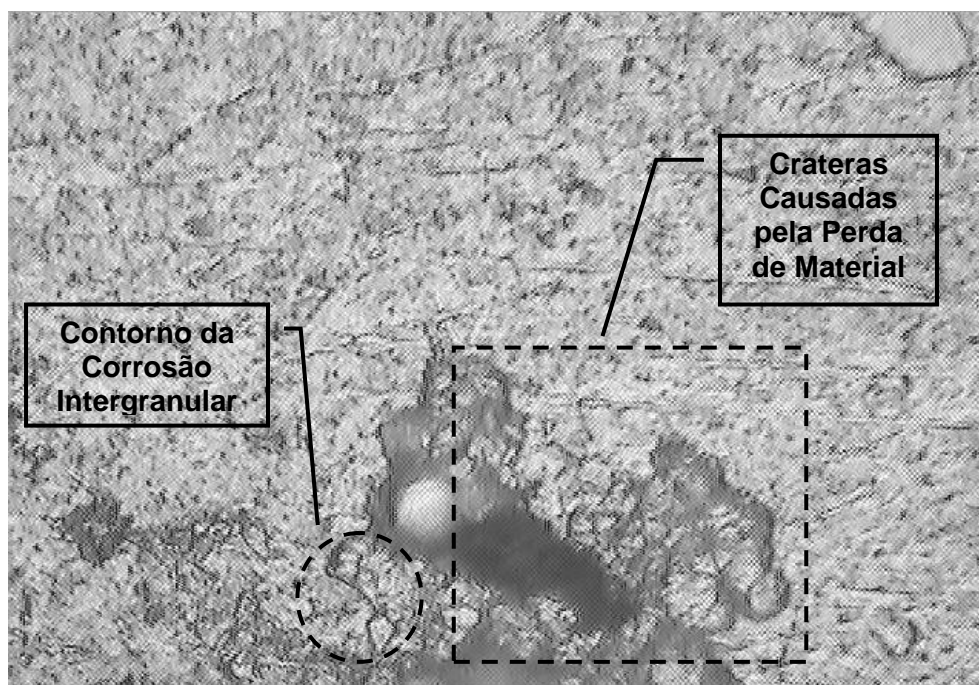
**Figura 27 - Vista frontal de uma amostra íntegra (80X)**

**Fonte: Autoria própria**



O material que não sofreu nenhuma influência serviu como forma de comparação com os que foram influenciados pelos fatores analisados nessa pesquisa, fluido de corte e variação térmica. A exposição no fluido de corte aliado com as variações de temperatura acelerou o processo de corrosão intergranular. Na figura 28 consegue-se visualizar um destacamento dos grãos, separando-se da matriz principal, motivado pela degradação dos materiais ligantes como Zinco, Magnésio e Cobre, são esses os causadores do enfraquecimento estrutural, pois são mais frágeis que a matriz de alumínio, esses materiais ligantes são responsáveis pela forte ligação entre um grão e outro, quando este elo enfraquece gera uma redução na resistência local, à medida que estes defeitos intersticiais se propagam a estrutura fica comprometida e se abre para inúmeros outros problemas, um deles é a fadiga, que acaba sendo intensificada.

A elasticidade microestrutural fica comprometida por que a capacidade de um grão retornar ao seu local de origem já não é a mesma, o escorregamento se acentua até o desenvolvimento final, gerando um colapso estrutural, ou seja, o rompimento do material.

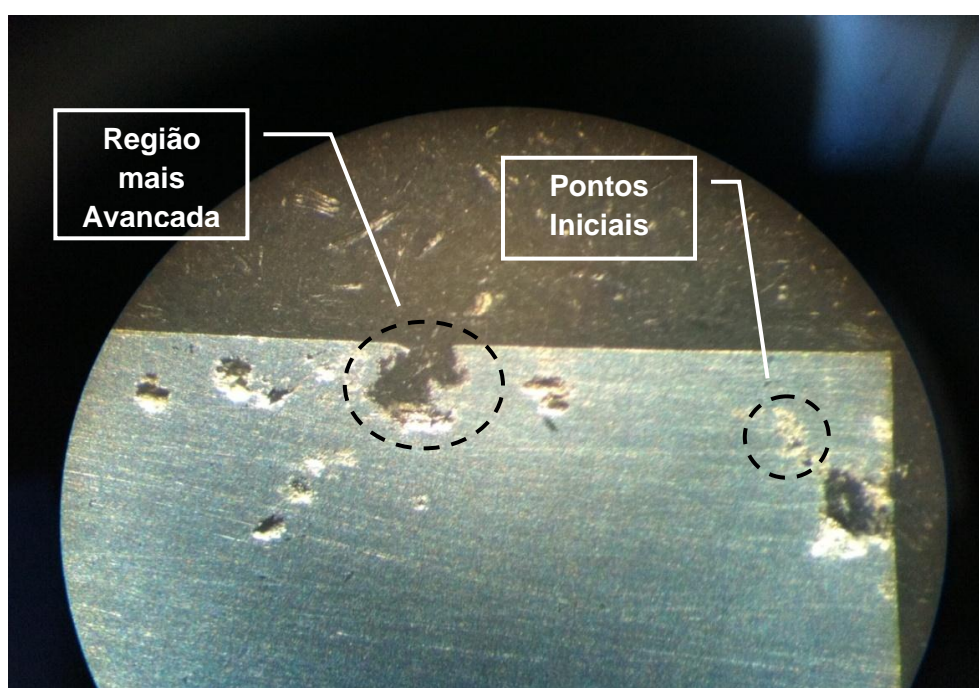


**Figura 28 - Contorno dos grãos atacados pela corrosão (400X)**

**Fonte: Autoria própria**

Com este aumento de 400 vezes visualizou-se nos locais indicados os pontos iniciais de circunscrição e os grãos sendo destacados. As regiões escuras são as áreas em que houve um declínio superficial gerado pela perda de material, formando crateras, essa variação na profundidade causa esta diferença de tonalidade.

Imagens obtidas por M.E.V (microscópio eletrônico de varredura) seriam muito úteis para um maior entendimento do desenvolvimento corrosivo, por permitir uma melhor visualização.



**Figura 29 - Fotografia da amostra mais danificada (120X)**

Fonte: Autoria própria

Na figura 29 tem-se uma visão mais generalizada, é possível enxergar com maior nitidez as crateras geradas pelo destacamento dos grãos, ver como a amostra foi comprometida macroscopicamente. São encontrados muitos pontos de corrosão em regime inicial e também já mais avançado, e ver a diferença que o fluido de corte e as variações térmicas causaram nesta liga de alumínio.

A tabela 2 resume todas as análises realizadas por microscópio classificando-as em níveis da deterioração causada pela corrosão intergranular, atribuindo pesos para quantificar a corrosão sofrida na amostra.

- Pouco ou nenhum sinal de alteração: 1;

- Incidência baixa: 2;
- Alta incidência: 3;

**Tabela 2- Resumo das análises microscópicas**

<b>Tipo de Amostra</b>	<b>Incidência de Corrosão</b>
Sem nenhum tipo de exposição	<b>1</b>
Exposta a variação térmica	<b>2</b>
Exposta ao fluido e a variação térmica	<b>3</b>

**Fonte: Autoria própria**

#### 4.2 ANÁLISE DE DUREZA

Na tabela 2 é mostrada a diferença de dureza superficial entre as amostras que foram expostas à imersão no fluido de corte e à variações de temperatura. Nela estão expostos os valores medidos por meio do ensaio de dureza para cada grupo de amostra, divididos em três.

- Amostras que ficaram em banho de fluido de corte e depois sofreram variações de temperatura: **Grupo n°1**;
- Amostras que sofreram variações de temperatura: **Grupo n°2**;
- Amostra sem nenhuma alteração: **Grupo n°3**;

**Tabela 3 - Resultado do ensaio de dureza (HRB)**

	<b>Grupo n°1</b>			<b>Grupo n°2</b>		<b>Grupo n°3</b>
	1° Amostra	2° Amostra	3° Amostra	1° Amostra	2° Amostra	Amostra única
<b>1° Medição</b>	76	73,7	75,3	75,5	76,25	77
<b>2° Medição</b>	76,7	77	80	75,75	78	76,5
<b>3° Medição</b>	73,9	78,3	76	79,3	80,7	77,8

**Fonte: Autoria própria**

Após reunir a dureza superficial de cada conjunto, fez-se uma média aritmética simples para cada grupo de amostras e chegou-se a uma dureza média resultante de cada situação.

**Tabela 4 - Média da dureza de cada grupo de amostras**

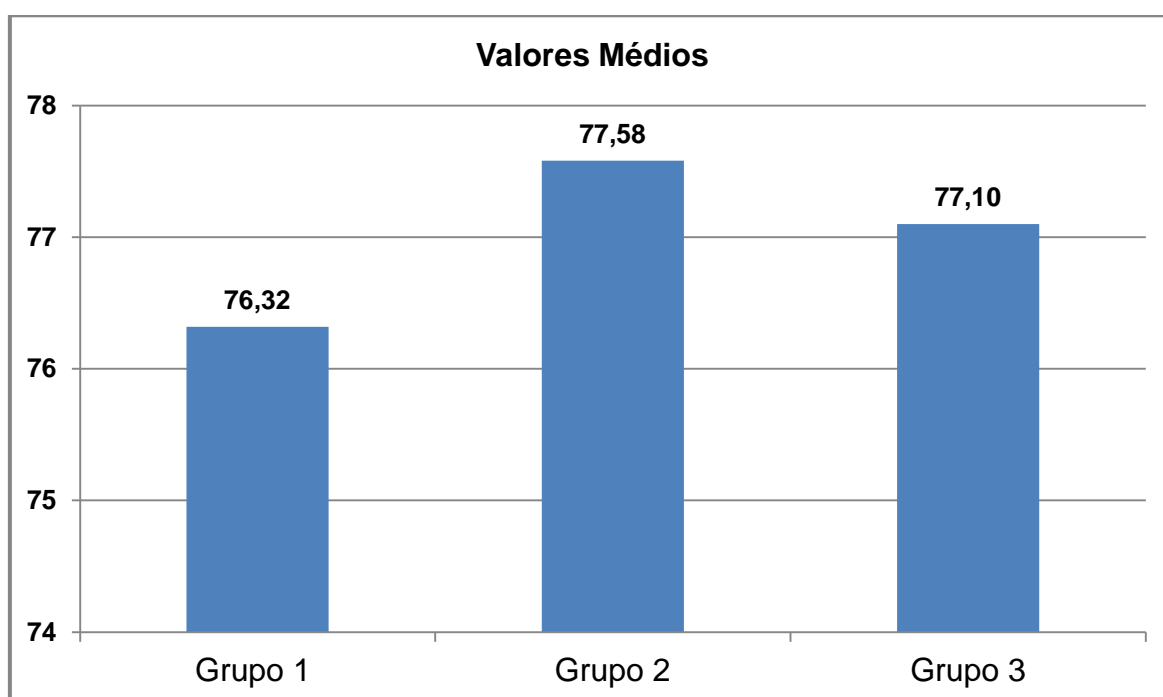
<b>Média</b>	<b>Dureza Rockwell (HRB)</b>
Grupo n°1	76,32
Grupo n°2	77,58
Grupo n°3	77,10

**Fonte: Autoria própria**

Os três grupos de amostras apresentaram resistências diferentes, as amostras do grupo n°2 e n°3 tiveram maior valor de dureza superficial, demonstrando maior integridade superficial.

O grupo n°1 teve uma média de dureza menor por causa da redução na força de ligação nos grãos que compõe a estrutura próxima a superfície, este enfraquecimento superficial do material pode ter sido causado pela corrosão analisada nessa pesquisa.

O gráfico da figura 30 demonstra essa diferença de resistência, evidenciando as consequências da corrosão na estrutura e sua diminuição de resistência mecânica superficial.



**Figura 30 - Gráfico de comparação de dureza (HRB)**

**Fonte: Autoria Própria**

A Corrosão intergranular é sempre o limiar de um processo corrosivo. É a etapa inicial de um processo que desenvolve para uma série de outras situações críticas para o material, o teste de dureza evidencia o decréscimo na resistência em 1,62%, comparando com a média do grupo 2, que sofreu a mesma variação térmica. Em longo prazo o dano se intensifica cada vez mais nos grãos cristalinos, reduzindo a resistência mecânica nominal do material, ou seja, a força de ligação estrutural inicial do material.

O grupo 2 teve maior valor que o grupo 3 motivado pelo leve endurecimento superficial que a variação térmica causou, aumentou as tensões residuais nesses locais, ou seja, nas proximidades da superfície ocorreu um leve tensionamento entre os grãos da liga de alumínio. O valor de dureza do grupo 1 foi inferior pelo desarranjo desencadeado pela corrosão intergranular, as ligações entre os grãos foram comprometidas, reduzindo sua resistência.

Para concluir e exemplificar os dados obtidos com o ensaio de dureza demonstra-se por meio da tabela 5 as conclusões finais. Definimos três pesos de avaliação:

- Sem variações no padrão de resistência superficial: 0;
- Aumento da resistência mecânica superficial: 1;
- Redução na resistência mecânica superficial: 2;

**Tabela 5 – Resumo da análise de dureza**

<b>Média</b>	<b>Comportamento da dureza</b>
Grupo nº1	2
Grupo nº2	1
Grupo nº3	0

**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.3 ANÁLISE DO ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado para comparar a resistência mecânica dos corpos de prova que ficaram em banho no fluido de corte com os corpos de prova que não sofreram nenhuma exposição que viesse a acelerar a corrosão

intergranular. Dessa forma é possível quantificar a influência do fluido nesta liga de alumínio. Os resultados são apresentados na tabela 6.

**Tabela 6 - Dados resultantes dos ensaios de tração**

	<b>Limite De Resistência (KN)</b>	<b>Limite De Escoamento (KN)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Estricção (%)</b>
<b>Ensaio 1</b>	55,65	45,2	6,3	6,8
<b>Ensaio 2</b>	64,75	56,8	8,6	13,2
<b>Ensaio 3</b>	63,71	54,6	9,6	14,4
<b>Ensaio 4</b>	63,62	54,4	7,6	9,6

**Fonte: Autorial Própria**

O ensaios 1 e 2 da tabela 6 são dos corpos de prova que não foram imersos em fluido de corte. O ensaio 1 apresentou valores distantes do ensaio 2 por que foi o primeiro ensaio de tração realizado pela máquina, quando fica parada por muito tempo o primeiro ensaio realizado sempre perde-se devido ao auto ajuste, este primeiro ensaio serviu apenas para auto calibração da máquina, por este motivo foi desconsiderado para o cálculo das médias na tabela 7.

Os ensaios 3 e 4 foram realizados com os corpos deixados imersos em fluido de corte. Quando analisou-se os valores obtidos foi possível perceber uma discrepância com os valores do ensaio 2.

**Tabela 7 - Média dos valores adquiridos com o ensaio de tração**

	<b>Limite De Resistência (KN)</b>	<b>Limite De Escoamento (KN)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Estricção (%)</b>
<b>Amostra sem fluido de corte</b>	64,75	56,80	8,80	13,20
<b>Amstras com fluido de corte</b>	63,66	54,51	8,60	12,10

**Fonte: Autorial Própria**

Na tabela 6 é separado apenas o ensaio 2 para ser comparado com a média dos ensaios em que os corpos de prova foram expostos ao fluido, que é o ensaio 3 e 4. Quando comparou-se os tipos de amostras apresentadas na tabela 7 observou-se que os corpos de prova que ficaram no fluido de corte apresentaram diminuição em sua resistência, que foi pequena devido ao seu período de permanência na imersão, mas que foi suficiente para levantar indicações sobre a teoria apresentada no decorrer do estudo.

O limite de resistência decaiu 1.68%, que pode ser devido a presença do fluido de corte, valor significativo quando é considerado o tempo de apenas duas semanas que as amostras permaneceram no fluido de corte.

O limite elástico diminuiu em média 4% o que pode ter sido motivado pelo enfraquecimento nas ligações cristalinas geradas pela corrosão, os grãos podem ter ficado com suas ligações enfraquecidas e não conseguindo retornar a posição inicial, prejudicando sua reestruturação.

A tabela 8 faz um resumo comparando os resultados finais de cada ensaio de tração.

**Tabela 8 - Conclusão do ensaio de tração**

<b>Média</b>	<b>Resultado</b>
Ensaio 1	Descartado
Ensaio 2	Resistência mecânica padrão
Ensaio 3	Perda de resistência mecânica
Ensaio 4	Perda de resistência mecânica

**Fonte: Autoria Própria**

Os valores do ensaio 2 são tomados como referência por que o corpo de prova não foi exposto a nenhuma situação para acelerar a perda de resistência, diferente dos corpos de prova do ensaio 3 e 4 que ficaram em banho no fluido de corte. Os quatro corpos de prova foram usinados a partir do mesmo tarugo de alumínio, ou seja, sem nenhuma influência externa todos eles dariam os mesmos valores de resistência mecânica.

## 5 CONCLUSÃO

Nos ensaios realizados pode-se observar os efeitos corrosivos em corpos de prova submetidos ao contato com fluido de corte. As análises possibilitaram levantar indicações de que o fluido de corte e as variações térmicas aplicadas podem contribuir para a aceleração de processos corrosivos em ligas de alumínio.

Observou-se que é grande o número de variáveis que cercam o estudo, e que para obter resultados conclusivos é importante continuar as análises voltadas para o desenvolvimento, identificação e consequências da corrosão que ocorre entre os grãos cristalinos da liga de alumínio 7050.

Outro ponto importante é que para a realização dos experimentos deve-se aumentar o número de amostras e fazer o maior número possível de repetições para cada um dos experimentos, pois assim será possível levantar informações mais precisas e conclusivas.

E algo importante de salientar é que não se intensifiquem apenas estudos voltados aos materiais de aplicação aeronáutica, mais em todos os outros aplicados na engenharia, já que compreender e assegurar um material aplicado em qualquer que seja o equipamento deve resultar em confiabilidade, protegendo de qualquer risco que possa ser consolidado por alguma falha não monitorada.



## REFERÊNCIAS

ASHBY, MICHAEL F.; JONES, DAVID R. H.. FATIGUE FAILURE. IN: **ENGINEERING MATERIALS: AN INTRODUCTION TO PROPERTIES APPLICATIONS, AND DESIGN**. 4. ED. LONDON: BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2012. CAP. 17. P. 249-298.

ASKELAND, Donald R; PHULE, Pradeep P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learnig, 2008.

ASSIS, Camila Molena de. **Principais tipos de corrosão e seus mecanismos**. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/primaquim/aula-3-principais-tipos-de-corroso/>>. Acesso em: 15 abr. 2014.

BRAGA, Ana Paola Villalva. **Análise de ligas de alumínio aeronáuticas conformadas por jateamento com granalhas**: Caracterização e previsão de deformação. 2011. 277 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/.../3/.../Dissertacao\\_Ana\\_Paola\\_V\\_Braga.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/.../3/.../Dissertacao_Ana_Paola_V_Braga.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2014.

CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

COUTINHO, CARLOS BOTTREL. MATERIAIS RESISTÊNTES À CORROSÃO E A OXIDAÇÃO. IN: COUTINHO, CARLOS BOTTREL. **MATERIAIS METÁLICOS PARA ENGENHARIA**. BELO HORIZONTE: FUNDAÇÃO CHRISTIANO OTONNI, 1992. CAP. 1. P. 1-73.

DUTRA, A.C; NUNES, L.P. **PROTEÇÃO CATÓDICA: TÉCNICA DE COMBATE À CORROSÃO**. Rio de Janeiro editora TÉCNICA 1987: Editora TÉCNICA, 1987.

DUTRA, A.C; NUNES, L.P. **PROTEÇÃO CATÓDICA: TÉCNICA DE COMBATE À CORROSÃO**. Rio de Janeiro editora TÉCNICA 1987: Editora TÉCNICA, 1987.

EWING, J; HUMFREY, J. **The Fracture of Metals under Repeated Alternations of Stress**. Disponível em: <<http://www.archive.org/details/philtrans06412238>>. Acesso em: 2 fev. 2014.

FRANKEL, Gerald; WOLFE, Doug. **Como a corrosão se espalha em liga de alumínio**. 2004. Publicação elaborada pelo site inovação tecnológica. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010170041201#.U95pZbd0xdg>>. Acesso em: 07 jan. 2014.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2007.

JUNIOR, Carlos Henrique Peroni. **Pressurização de aeronaves**. 2013. Disponível em: <<http://www.diariodearaxa.com.br/Materia/Colunista/Raphael-Benencase/2013/10/Pressurizacao-de-aeronaves-como-funciona/769.aspx#ixzz369qLq5RX>>. Acesso em: 28 abr. 2014.

MENEGHESSO, Adeval Antonio. **Por que o alumínio não enferruja?** Disponível em: <<http://www.revistaaluminio.com.br/recicla-inovacao/15/artigo210622-1.asp>>. Acesso em: 26 abr. 2014.

MEYERS, Marc; CHAWLA, Krishan. Fatigue Failure. In: MEYERS, Marc; CHAWLA, Krishan. **Mechanical behavior of materials**. 2. ed. New York: Cambridge University, 2009. Cap. 14. p. 713-725.

NUNES, L.P; LOBO, A.C.O. **PINTURA INDUSTRIAL NA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA**. RIO DE JANEIRO: LTC, 1990.

PADILHA, Angelo Fernando; AMBROZIO FILHO, Francisco. **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo: Hemus, 2004.

PIMENTA, Gutemberg de Souza. **Corrosão e Proteção: Corrosão intergranular**. 2007. Disponível em: <<http://www.abraco.org.br/corros17.htm>>. Acesso em: 17 abr. 2014.

R, Davis J. **Corrosion: understanding the basics**. Ohio: Davis & Associates, 2000.

VAN VLACK,; H, LAWRENCE. **PRINCÍPIOS DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. SÃO PAULO: EDGARD BLÜCHER LTDA, 1970. 413 P.

YOON, Joe. **Static Discharge Wicks**. 2005. Disponível em:  
<<http://www.aerospaceweb.org/question/design/q0234.shtml>>. Acesso em: 6 fev. 2014.