

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PPGEM - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CIÊNCIAS MECÂNICAS - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS APLICADOS À
ENGENHARIA

Alisson Lemos dos Santos

**REQUISITOS E RESTRIÇÕES DA UTILIZAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE NA
USINAGEM DE LIGA DE ALUMÍNIO 7075 QUANTO A PROPAGAÇÃO DE CORROSÃO
INTERGRANULAR**

Dissertação

Cornélio Procópio/PR
2023

ALISSON LEMOS DOS SANTOS

**REQUISITOS E RESTRIÇÕES DA UTILIZAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE NA
USINAGEM DE LIGA DE ALUMÍNIO 7075 QUANTO A PROPAGAÇÃO DE
CORROSÃO INTERGRANULAR**

**Requirements and restrictions on the use of cutting fluids in the machining of
aluminium alloy 7075 regarding the propagation of intergranular corrosion**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em 22/12/2022 da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Janaína Fracaro de Souza Gonçalves.

CORNÉLIO PROCÓPIO


2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.

APÊNDICE A**TERMO DE LICENCIAMENTO**

 <p>4.0 Internacional</p>	<p>Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.</p>
---	---

Referência: Processo nº 23064.035387/2020-28



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio**



ALISSON LEMOS DOS SANTOS

REQUISITOS E RESTRIÇÕES DA UTILIZAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE NA USINAGEM DE LIGA DE ALUMÍNIO 7075 QUANTO A PROPAGAÇÃO DE CORROSÃO INTERGRANULAR

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Ciências Mecânicas.

Data de aprovação: 22 de Dezembro de 2022

Janaina Fracaro De Souza Goncalves, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rodrigo Henriques Lopes Da Silva, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Yaskara Fabiola De Monteiro Marques Leite, Doutorado - Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (Uern)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 26/12/2022.

Dedico esta dissertação a minha família, especialmente a minha mãe, Neusa Lemos dos Santos e a minha esposa, Daniela Cristina Bottega, foram fundamentais para me apoiar ao longo de todo esse processo, me apoiando e incentivando em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Foram longos anos até a chegada neste momento de conclusão de minha dissertação, sou grato a todas as pessoas que me apoiaram durante essa longa trajetória, família, amigos e professores. Foram vários os momentos em que pensei em desistir, mas graças a todos que estiveram ao meu lado consegui chegar a esse momento tão aguardado.

Faço um agradecimento especial a minha orientadora Janaína por ter me dado amplo suporte para a continuidade e finalização deste projeto, sem ela não teria conseguido encerrar mais esse ciclo em minha vida educacional.

RESUMO

Santos, Alisson. **REQUISITOS E RESTRIÇÕES DA UTILIZAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE NA USINAGEM DA LIGA DE ALUMÍNIO 7075 QUANTO A PROPAGAÇÃO DE CORROSÃO INTERGRANULAR.** 2023. 96 folhas. Dissertação, programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2023. Esta pesquisa apresenta uma abordagem no desenvolvimento da corrosão intergranular na liga de alumínio 7075, comparando a influência do fluido de corte na diminuição da resistência à fadiga motivada pelo uso em componentes estruturais de aeronaves. De início é apresentado o que é este tipo de corrosão e como se desenvolve na estrutura cristalina, observando quais as variáveis que compactuam com o agravamento desse problema e os seus impactos na microestrutura, observando a diminuição de resistência estrutural por meio da análise de fadiga, que se sobressai ainda mais devido às circunstâncias que serão apresentadas durante a descrição da pesquisa. A realização dos ensaios em laboratório buscou avaliar as reações do material quando exposto por um período ao fluido de corte, visando analisar e comparar o desenvolvimento da corrosão na microestrutura, com esse objetivo avaliou-se a perda de resistência mecânica nas amostras sob variáveis diferentes, além das comparações realizadas na diminuição da resistência motivada pela variação da geometria de manufatura. Os resultados obtidos indicaram, a diferença que a amina presente no fluido de corte traz no desenvolvimento da corrosão intergranular e conseqüentemente no processo de fadiga, mesmo que em pequena proporção, constatou-se os efeitos da propagação da corrosão intergranular na liga de alumínio estudada e a influência na redução da resistência mecânica da liga.

Palavras-chave: Liga de Alumínio 7075. Corrosão Intergranular. Fluido de Corte. Resistência Mecânica.

ABSTRACT

Santos, Alisson. **REQUIREMENTS AND RESTRICTIONS ON THE USE OF CUTTING FLUIDS IN THE MACHINING OF ALUMINUM ALLOY 7075 REGARDING THE PROPAGATION OF INTERGRANULAR CORROSION.** 2023. 96 sheets. Dissertation, graduate program in Mechanical Engineering – Federal Technological University of Paraná. Cornelio Procopio, 2023. This research presents an approach to the development of intergranular corrosion in aluminum alloy 7075, comparing the influence of cutting fluid on the decrease in fatigue resistance motivated by its use in aircraft structural components. At first, it is presented what this type of corrosion is and how it develops in the crystalline structure, observing which variables combine with the worsening of this problem and its impacts on the microstructure, observing the decrease in structural resistance through fatigue analysis, which stands out even more due to the circumstances that will be presented during the description of the research. The carrying out of tests in the laboratory will seek to evaluate the reactions of the material when exposed for some time to the cutting fluid and to analyze and compare the development of corrosion in the microstructure, with this objective analysis of the loss of mechanical resistance in the samples under variables many other, in addition to the comparisons made in the decrease of resistance motivated by the variation of the manufacturing geometry. The results obtained indicated the difference that the amine present in the cutting fluid brings in the development of intergranular corrosion and consequently in the fatigue process, even if in a small proportion, the effects of the propagation of intergranular corrosion in the aluminum alloy studied and the influence on the reduction in the mechanical resistance of the alloy.

Keywords: Aluminum Alloy 7075. Intergranular Corrosion. Cutting Fluid. Mechanical resistance.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1	Descrição da Corrosão	16
3.2	Tipos e Características da Corrosão	17
3.3	Processo de Usinagem	20
3.3.1	Furação em chapas aeronáuticas	20
3.3.2	Rebarbas	25
3.4	Tipos e Características das Ligas de Alumínio	25
3.5	Corrosão Intergranular em Liga de Alumínio	29
3.6	Estudo da Fadiga	32
3.7	Condições de Intensificação da Corrosão Intergranular	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	Verificação da Influência de Fluidos de Corte na Propagação de Corrosão Intergranular	36
4.1.1	Formas de preparo e métodos de análise dos ensaios	37
4.1.2	Descrição do ensaio de tração	44
4.2	Estudo Microestrutural e da Resistência a Corrosão	45
4.2.1	Metodologia	46
4.3	Ensaio de Fadiga	55
4.3.1	Forma de Preparo e Métodos de Análise dos Ensaios	56
4.3.2	Descrição do ensaio de fadiga	62
4.3.3	Análise dos resultados de fadiga	64
4.4	Descrição do Ensaio de Tração	67
4.4.1	Obtenção dos resultados	69
4.4.2	Análise computacional das chapas	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
5.1	Simulação Computacional	75
5.2	Análise das Imagens Microscópicas das Amostras	80
5.2.1	Análise da Influência de Fluidos de Corte na Propagação de Corrosão Intergranular	80
5.2.2	Análise de Dureza	83

5.2.3	Análise do Ensaio de Tração	87
5.3	Discussão do Estudo Microestrutural e da Resistência a Corrosão .	89
5.4	Analisando o Ensaio de Fadiga	91
6	CONCLUSÃO	92
	BIBLIOGRAFIA	93

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fila de reatividade	18
Figura 2 – Fratura frágil intergranular	19
Figura 3 – (a) chapa de alumínio curvada. (b) Painel recoberto com <i>Primer</i>	21
Figura 4 – (a) Conjunto de quatro painéis e (b) o segmento da fuselagem.	22
Figura 5 – Montagem dos segmentos formando a fuselagem.	22
Figura 6 – Junta orbital composta dos dois segmentos e da cinta orbital	23
Figura 7 – Entradas da broca na furação da cinta orbital	24
Figura 8 – Liga 7075-T6 grãos recristalizados (claro) e fragmentos de grãos não recristalizados que aparecem escuros como resultado da precipitação nos limites dos grãos 455 X	27
Figura 9 – Amostra AA 7075 recozida mostrando a distribuição aleatória de fases insolúveis intercaladas com partículas de precipitados de Mg Zn, Al, Cu que precipitam solução em sólida durante o arrefecimento lento controlado do recozimento 445x	28
Figura 10 – Composição da Liga de Alumínio 7075 – T651	30
Figura 11 – Corrosão intergranular em liga de alumínio	31
Figura 12 – Progressão das fissuras causadas pela fadiga	33
Figura 13 – Curva de análise de fadiga	34
Figura 14 – Selagem da fuselagem para a pressurização da aeronave	35
Figura 15 – Sequência dos experimentos realizados	36
Figura 16 – Fluxograma das etapas de preparação e análise das amostras.	37
Figura 17 – a) b) Material para a preparação das amostras do ensaio metalográfico e de dureza	38
Figura 18 – a) Preparação e o corpo de prova pronto para o ensaio de tração	38
Figura 19 – b) Preparação e o corpo de prova pronto para o ensaio de tração	39
Figura 20 – Fluxograma com as etapas de preparação do ensaio de tração	39
Figura 21 – Corpos de prova imersos em fluido de corte	40
Figura 22 – Forno industrial utilizado no aquecimento das amostras	41
Figura 23 – Fluxograma da preparação para análise microscópica	41
Figura 24 – Máquina utilizada para realização do embutimento	42
Figura 25 – Amostra pronta embutida	43
Figura 26 – a) e b) Imagem microscópica com e sem aplicação de ácido fluorídrico (300 e 380X)	43
Figura 27 – a) e b) Pontos de análise microscópica da amostra	44
Figura 28 – Fluxograma do ensaio de tração	45
Figura 29 – Máquina utilizada para a realização do ensaio de tração	45
Figura 30 – Fluxograma do procedimento de realização do experimento	46

Figura 31 – Dimensões da peça de alumínio	47
Figura 32 – Sistema de refluxo para simulação de corrosão.	48
Figura 33 – Barras pré-corte das amostras	49
Figura 34 – 12 amostras após o corte	49
Figura 35 – Amostras polidas e prontas para serem inseridas no sistema corrosivo .	50
Figura 36 – Amostra devidamente marcadas	50
Figura 37 – Seis amostras nos balões com fluido de corte, à esquerda, e seis amostras no balão com água, à direita.	51
Figura 38 – Uma amostra no balão com fluido e corte, a esquerda, e uma amostra no balão apenas com água, a direita.	51
Figura 39 – Avaria no equipamento	52
Figura 40 – Amostras serradas em seção transversal após período de corrosão . . .	52
Figura 41 – As 17 amostras após ataque químico	54
Figura 42 – Sistema de referência para identificação da borda analisada: a) Superior, b) Inferior, c) Esquerda e d) Direita	55
Figura 43 – textbfSequência do ensaio de fadiga	55
Figura 44 – (a) Material bruto AA 7075	56
Figura 45 – (b) usinagem dos corpos de prova por torneamento	56
Figura 46 – 21 corpos de prova que foram usinados pelo torno CNC	57
Figura 47 – Corpo de prova após a usinagem	58
Figura 48 – Lixa 1500 para a primeira etapa do polimento	58
Figura 49 – Corpo de prova após o polimento final	59
Figura 50 – Separação e numeração dos 21 corpos de prova	60
Figura 51 – 7 corpos de provas após exposição da emulsão em fluido de corte com amina	61
Figura 52 – 7 corpos de provas após exposição da emulsão de fluido de corte sem amina	61
Figura 53 – Desenho corpo de prova	63
Figura 54 – Máquina universal para ensaio de fadiga	64
Figura 55 – Geometria do corpo de prova para o ensaio de tração	69
Figura 56 – Vista superior da montagem entra a chapa 1 e 2	70
Figura 57 – emphVista inferior da montagem entra a chapa 1 e 2	70
Figura 58 – Vista da geometria da secção do furo chapa superior	70
Figura 59 – textbfComparativo entre áreas da chapa 1	71
Figura 60 – Força aplicada (adaptado)	71
Figura 61 – emphTipo de fixação (Adaptado)	72
Figura 62 – Modelos de malha gerada pelo software	74
Figura 63 – Tensão de Von Mises, análise estática nodal tensão 1, escala de distorção: 8.89838	76

Figura 64 – Deslocamento resultante URES, análise estática, deslocamento estático, deslocamento 1, escala de distorção: 8.89838	77
Figura 65 – Deformação equivalente ESTRN, deformação estática, deslocamento 1, escala de distorção: 8.89838	77
Figura 66 – Medidas do alojamento	78
Figura 67 – Secção do alojamento original	79
Figura 68 – Secção do alojamento proposto	80
Figura 69 – Contorno frontal das amostras imersas em fluido (380X)	81
Figura 70 – Amostra sem exposição corrosiva (300 X)	82
Figura 71 – Contorno frontal amostra submetida a variações térmicas (300X)	82
Figura 72 – Contorno dos grãos atacados pela corrosão (400X)	83
Figura 73 – Gráfico de comparação de dureza (HRB)	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Período de retirada de cada amostra	53
Tabela 2 – Período de retirada de cada amostra	62
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de Fadiga	65
Tabela 4 – Dados físicos da Chapa 1	67
Tabela 5 – Informações de malha	72
Tabela 6 – Resultados da análise e suas posições na malha (Chapa 1 original) . .	75
Tabela 7 – Resultados da análise e suas posições na malha (Chapa 1 proposta) . .	78
Tabela 8 – Resultado do ensaio de dureza(HRB)	85
Tabela 9 – Média de dureza de cada grupo de amostras	86
Tabela 10 – Dados resultantes dos ensaios de tração	87
Tabela 11 – Média dos valores adquiridos com o ensaio de tração	88

1 INTRODUÇÃO

Na maioria das vezes o processo corrosivo acontece sem que se perceba, mas ele está sempre presente direta ou indiretamente em sistemas aplicados na engenharia, pois pode ocorrer em estruturas metálicas, eletrodomésticos, automóveis, refinarias, tubulações metálicas, 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 sujeitos a esse 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.

Na corrosão intergranular o grão é envolvido pelo processo corrosivo e vai perdendo gradativamente sua ligação com a matriz. O desenvolvimento do trabalho possibilitará 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 transforma uma pequena massa nesses interstícios, isso reduz a força de ligação entre os grãos que constituem a estrutura, essa diminuição da energia de ligação implica na falha microestrutural ocasionada pela amplificação do processo de fadiga.

Esse mecanismo corrosivo analisado ocorre no material precipitado que se localizado 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.

A liga de alumínio é amplamente utilizada e é muito susceptível ao fenômeno da fadiga nas estruturas utilizadas em aeronaves, ocasionado principalmente pela corrosão intergranular. Nesse sentido, devido ao enfraquecimento energético no contorno do grão ocorre esse problema, que acaba gerando concentrações de tensões pela estrutura e enfraquecendo sua capacidade de 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 o componente estrutural poderá resistir significará mais segurança e tempo entre as paradas de manutenção, resultando em maior vida útil para os equipamentos.

Existem fatores que podem acelerar a corrosão intergranular, e o presente estudo aborda a influência do fluido de corte e do composto amina como principal influenciador presente em sua composição. Portanto, 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 diante da exposição de fluido de corte com e sem amina em sua composição.

A pesquisa busca comprovar a influência do composto amina como agente acelerador da corrosão intergranular em liga de alumínio AA 7075, e como consequência, fator acelerador da fadiga estrutural.

A comparação da queda de resistência estrutural obtida pelo ensaio de fadiga, analisa o efeito da exposição de dois fluidos de corte, um com e outro sem amina de um mesmo fabricante, o que permitirá comprovar a contribuição da amina no processo de amplificação da corrosão intergranular e como essa corrosão influencia no processo de fadiga nas estruturas. As comparações presentes nesta pesquisa foram utilizadas para analisar os fluidos de corte utilizados na usinagem de ligas de alumínio (liga da série 7000), sendo posteriormente utilizado como componente estrutural principal nas aeronaves.

Componentes de alumínio são um dos constituintes de aeronaves comerciais desde o advento desse setor de transporte. Ao final da década de 1920, o primeiro avião comercial alçou voo e nele já haviam componentes fabricados em alumínio. Hoje, o mercado aeronáutico ainda continua crescendo e é estimado que até 2030 cerca de 31,5 mil aviões estarão operando, sendo que, desses, 23 mil serão novos, como afirma a fabricante Airbus (CAMARGO, 2013).

Para se ter uma noção, a empresa Airbus é uma das maiores do setor de aeronaves comerciais com entrega de 588 aeronaves em 2012 e valor estimado de mercado de US\$638 bilhões à época. A tecnologia de suas ligas é desenvolvida pela Alcoa (Aluminum Company of America), a qual diminui o peso final da aeronave em até 10%, reduzindo o custo de manufatura e manutenção em 30% quando comparado aos materiais compósitos. Devido a isso, o contrato assinado entre Airbus e Alcoa para fornecimento de ligas de alumínio foi de 1 bilhão de dólares (CAMARGO, 2013).

Como todos os materiais de componentes de engenharia, as ligas de alumínio também estão sujeitas à ação do tempo. A degradação associada às intempéries e condições desfavoráveis de trabalho que aceleram a oxidação é chamada de corrosão. Esse fenômeno eleva os custos de manutenção, seja ela corretiva ou preventiva, pois na aviação é exigido monitoramento constante da integridade dos materiais que compõem a aeronave.

Caso a manutenção não seja efetiva, o dano pode atingir a esfera social, visto que acidentes onde há falhas assistidas por corrosão geralmente custam vidas; logo, falhas catastróficas não são toleradas.

As intempéries poderão influenciar na corrosão do material empregado na construção dos componentes através de fatores como a umidade, temperatura, íons cloreto em suspensão (ambientes próximo ao mar), entre outros. Devido às condições de trabalho haverá aumento na susceptibilidade à corrosão, pois, com a elevação da temperatura, a oxidação é favorecida.

As estruturas que serão estudadas nessa pesquisa são compostas pela liga de alumínio

7050-T7451 e que são sujeitas ao processo de usinagem para atingir a sua forma final de uso. Esse processo é assistido por um fluido de corte que tem como funções reduzir o aquecimento da peça e carregar consigo o material retirado. Porém, esse fluido possui composição química que pode acelerar a corrosão da liga de alumínio e comprometer a sua aplicação.

Essas peças compostas pela liga em estudo são denominadas airframes, que contemplam as estruturas mecânicas atribuídas às asas, fuselagem e trem de pouso traseiro. Essas peças estão sujeitas à diferentes tipos de carregamento durante o voo. Como são cargas dinâmicas, ou seja, variáveis, a maioria dos esforços sofridos é cíclico, fator que pode levar a falha por fadiga do material, fenômeno esse que, quando assistido pela corrosão, possui risco ainda maior de ocorrer (MCDONALD, BOYKETT e JONES, 2013).

Do ponto de vista da fabricação, a usinagem expõe a liga de alumínio à corrosão por praticar a remoção de material da superfície juntamente com a camada protetora e inerente às peças de alumínio. Assim, durante o processo, o fluido de corte entra diretamente em contato com as regiões da microestrutura da liga mais susceptíveis à corrosão.

Conforme o exposto acima, para a melhoria da engenharia envolvida na construção das aeronaves, é de suma importância estudar as características e comportamentos dos materiais que compõem suas peças assim como entender como ocorre a degradação do material quando em contato com intempéries, levando em conta as condições de trabalho e condições de fabricação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o composto amina, presente na formulação de fluidos de corte, na diminuição da resistência mecânica da liga de alumínio série 7075 estudada.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos secundários nesse trabalho buscou-se:

- Analisar e comparar o desenvolvimento da corrosão intergranular na liga de alumínio 7075 motivado pela presença da amina no óleo de corte mineral.
- Avaliar a proporção da perda de resistência mecânica em âmbito quantitativo e qualitativo.
- Observar a proporção de aumento da fadiga na liga de alumínio 7075 motivada pela corrosão intergranular analisada;
- Verificar a influência da altura de rebarba na fratura de estruturas de Alumínio série 7000.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Os assuntos que serão abordados durante esta etapa são importantes para compreender os assuntos que se relacionam com a corrosão intergranular e como ela se encaixa no processo de desenvolvimento e fratura por fadiga. Portanto, será realizada uma revisão sobre o que é este tipo de corrosão, o processo de fadiga e as variáveis que a envolvem quando inseridas em uma estrutura de uma aeronáutica.

3.1 Descrição da Corrosão

A corrosão pode ser definida como a destruição dos materiais metálicos e não metálicos em contato com o meio ou ambiente, devido às interações de índole química e/ou mecânica. Os custos atingem somas astronômicas, na indústria naval, \$ 16 bilhões por ano nos EUA; na indústria automobilística, \$ 300 milhões por ano na Finlândia e 0,25% do PIB nos EUA; restauro da Torre Eiffel - França (7 000 t de aço), \$ 40 milhões cada 7 anos (50-60 t de tinta); restauro da Estátua da Liberdade - EUA devido à corrosão interna galvânica, mais de \$ 300 milhões; na área da produção de energia, \$ 5-10 bilhões por ano nos EUA; 2% do PIB (\$ 50 bilhões) na Austrália, 3-5% do PIB (\$ 10-15 bilhões) na Suíça, 4% do PIB (\$ 300 bilhões) nos EUA, entre outros. Os números apresentados mostram que a corrosão é um flagelo da Sociedade Moderna, dado que as perdas anuais dela resultantes, não contabilizando as de natureza humana, são da ordem de muitas centenas de bilhões de dólares (MARTINS, 2012).

A corrosão intergranular é a que ocorre entre os grãos ou cristais da rede cristalina do material metálico, apresentando como característica principal a perda de suas propriedades mecânicas cujo resultado é a fratura do material quando forem realizados por esforços mecânicos. Daí, quando ocorre a fratura, a corrosão passa a ser chamada de corrosão sob tensão fraturante (do inglês *stress corrosioncracking*) (Gentil, 1996).

A corrosão intragranular (intra = dentro) é a que ocorre dentro dos cristais do material metálico. Ela ocorre por meio da perda de propriedades mecânicas, podendo fraturar o material a qualquer momento, quando submetido a qualquer tipo de esforço mecânico. Se isso ocorrer em uma superfície metálica, uma simples corrosão intragranular passa a ser chamada de corrosão sob tensão fraturante (Gentil, 1996).

Existem circunstâncias que tornam a região de um contorno de grão muito reativa, provocando a corrosão intergranular ou intragranular. Isso significa uma desintegração da liga ou perda da resistência mecânica. A presença de impurezas é a grande causa dessa corrosão. Ela reduz o elemento no contorno de grão e enriquece o contorno de grão por um elemento de liga.

Liang et al. (1996) demonstraram que as Zonas Livre de Precipitado (ZLP) no limite dos grãos das ligas de Al-Cu-Li-Zr aumentaram a susceptibilidade à corrosão intergranular,

pois a ZLP ao lado do limite de grão amplifica a heterogeneidade eletroquímica entre os limites dos grãos e as regiões adjacentes.

O contorno de grão se transforma em área anódica e o grão funciona como área catódica. O ataque corrosivo é então denominado de intergranular cujo fenômeno se dá como reação eletroquímica. Os defeitos e imperfeições no interior dos cristais podem gerar situações de heterogeneidades seletivas, pois em alguns casos ocorre a inversão eletroquímica.

Em resumo, o estado precipitado nas ligas da série 7xxx pode desempenhar um papel crítico na propriedade da corrosão. No entanto, os motivos dos efeitos do precipitado, o estado sobre a propriedade de corrosão por estresse não foi ainda profundamente investigado.

O presente trabalho foca nos efeitos do estado precipitado sobre a resistência à corrosão intergranular em ligas de alumínio 7050. A investigação nos ajuda a compreender o estado de precipitação, mostrando a influência da amina presente no fluido de corte e como ele influencia na resistência à corrosão por estresse nas ligas da série 7xxx.

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.

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 isso pode-se constatar a importância de discutir e pesquisar o assunto, a fim de buscar inovações e sempre uma maior compreensão do assunto.

3.2 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.

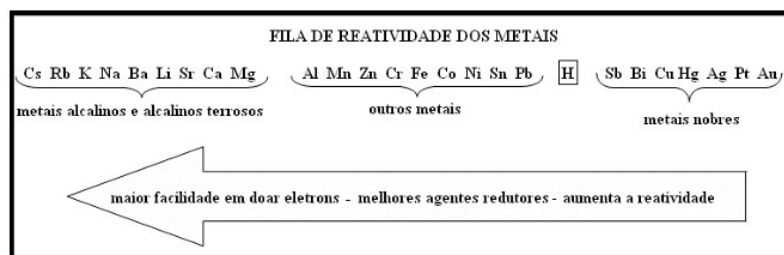
Já o processo catódico é a recepção de elétrons pelos íons ou moléculas de solução com características de potencial menos ativo, mais nobre, com valor mais positivo. Esse processo ocorre em regiões catódicas (GENTIL, 2007).

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, o qual é de ferro.

Figura 1 – Fila de reatividade



Fonte: Tabela Periodica Karina_Shafferman (2019).

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).

Ligas de alumínio de alta resistência com aplicações aeronáuticas possuem uma microestrutura com alta susceptibilidade à corrosão intergranular. O processo termomecânico ao qual a liga é submetida durante a fabricação da peça fornece ao material propriedades mecânicas otimizadas à aplicação devido à formação de precipitados dentro dos grãos; porém, esse processo também acelera a difusão de partículas para os

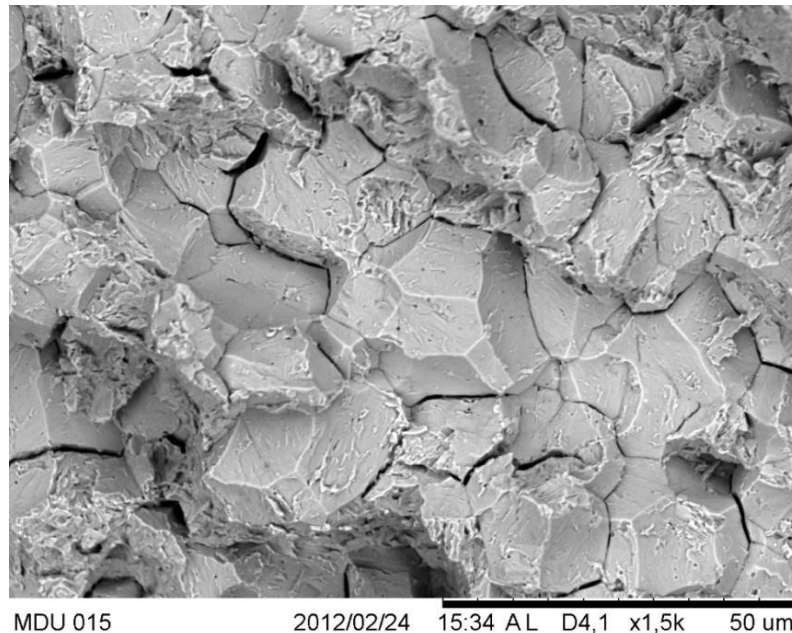
contornos de grãos, que empobrecem a resistência à corrosão da região (KNIGHT, SALAGARAS e TRUEMAN, 2010).

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.

Nesse 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).

Figura 2 – Fratura frágil intergranular



Fonte: Metalab análise de materiais (2012).

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.

A perda de material na região dos contornos dos grãos causa uma diminuição na densidade de ligações químicas que sustentam as propriedades mecânicas da liga. Quando a corrosão chega a níveis críticos, e aliada aos esforços mecânicos, pode haver separação total dos grãos em uma microrregião por onde se nucleia uma trinca. A propagação dessa trinca leva a falha do material em forma de ruptura (MAYERS e CHAWLA, 2009).

3.3 Processo de Usinagem

O processo de usinagem se mostrou importante para o advento da engenharia por possibilitar a fabricação de peças com melhor acabamento superficial bem como geometrias com formas diferenciadas com saliências, reentrâncias, furos rosqueados, furos passantes, etc (CHIAVERINI, 1986).

A operação de usinagem é realizada por uma ferramenta de corte que remove uma porção do material. Esses pequenos “pedaços”, frações de material removido, são conhecidos como “cavacos”, que possuem características específicas, indicando, entre outras coisas, a qualidade do acabamento, da ferramenta de corte, velocidade do corte, material de origem, etc (CHIAVERINI, 1986).

O nível de acabamento superficial refinado é de substancial importância para a fabricação das peças que estarão sujeitas à esforços cíclicos. Imperfeições na superfície são pontos concentradores de tensão que serão locais de nucleação de trinca, as quais podem aumentar de tamanho durante a vida útil do material dependendo das condições de operação. Numa definição ampla, a nucleação da trinca, o seu crescimento e a fratura do material caracterizam o fenômeno de fadiga (MAYERS e CHAWLA, 2009).

É durante o processo de usinagem que se aplica o fluido de corte que contribuirá durante o processo de retirada de material nos posteriores componentes estruturais, é com base nesse processo que busca-se analisar os efeitos de corrosão e seguinte sistema de fadiga, busca-se quantificar o impacto ao longo da vida útil desses componentes a partir do seu processo de usinagem.

3.3.1 Furação em chapas aeronáuticas

No setor aeronáutico, a furação é uma das operações de usinagem mais comuns, sendo que a quantidade de furos em uma aeronave pode ultrapassar 1,3 milhões (Terenzi, 2010).

Além da grande quantidade, os furos são realizados em locais diferentes, às vezes de difícil acesso e engloba uma gama considerável de materiais, o que torna complicada a automação completa dos processos de furação. Na indústria aeronáutica, diferentemente

de muitos outros setores, várias operações de montagem e fabricação ainda são feitas manualmente. No entanto a corrida generalizada pela automação, também presente na aeronáutica, faz com que uma dedicação especial seja dada à automação dos processos de fabricação em aeronaves .

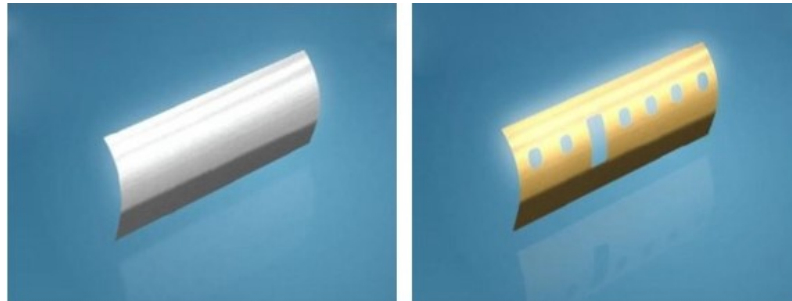
Um avião normalmente utilizado na aviação civil é composto basicamente de uma fuselagem, superfícies de sustentação, estabilização e de comando e sistema de propulsão. Além da asa, que é a maior responsável pela sustentação, a maioria das aeronaves possui superfícies estabilizadoras verticais e horizontais que são denominadas empenagens.

Durante a fabricação do avião, chapas e estruturas de vigas são montadas em pequenas seções ou painéis e em seguida são encaixados uns aos outros. Formam-se assim anéis, que fixados entre si, geram a fuselagem completa.

Inicialmente as chapas de alumínio que serão utilizadas como revestimento são curvadas por um processo de calandragem até chegarem ao raio correto especificado em projeto Figura 3 (a).

Os painéis são cortados e ajustados formando-se as janelas, porta e outras necessidades. Em seguida recebem um tratamento de superfície com uma camada denominada *Primer* que será responsável para evitar a corrosão das chapas Figura 3 (b).

Figura 3 – (a) chapa de alumínio curvada. (b) Painel recoberto com *Primer*.



Fonte: Terenzi (2010).

Os segmentos de fuselagem são geralmente resultados da emenda de quatro conjuntos de painéis. Estes painéis são ligados à parte estrutural composta de reforçadores longitudinais (*stringers*) e reforçadores transversais (cavernas ou *frames*) Figura 4. Essa ligação entre as chapas e os reforçadores é feita principalmente por meio de rebites e pinos.

Figura 4 – (a) Conjunto de quatro painéis e (b) o segmento da fuselagem.

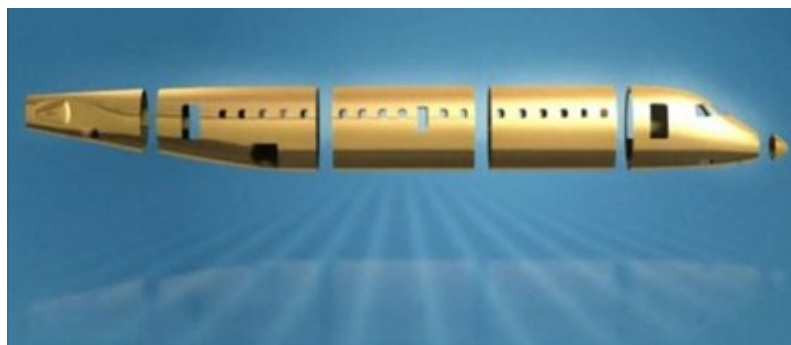


Fonte: Terenzi (2010).

Feita a montagem dos segmentos da fuselagem individualmente, é necessário uni-los para formar a fuselagem final Figura 5.

Durante a emenda dos segmentos é necessário realizar um complicado processo de alinhamento entre eles. Essa etapa envolve estruturas com grandes volumes, mas exige pequenos erros e desvios. A tarefa de alinhamento pode ser feita através de suportes reguláveis manualmente ou por meio de sistemas automatizados.

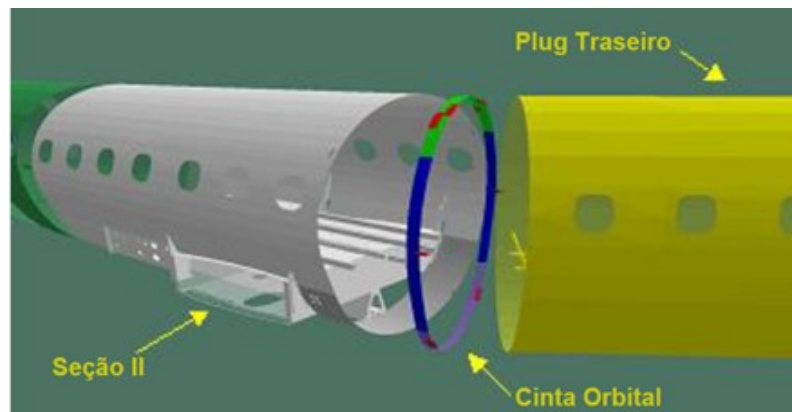
Figura 5 – Montagem dos segmentos formando a fuselagem.



Fonte: Terenzi (2010).

A furação, fixação provisória e rebiteagem da cinta ao revestimento da fuselagem requerem uma atenção maior.

Figura 6 – Junta orbital composta dos dois segmentos e da cinta orbital



Fonte: Terenzi (2010).

Há dificuldades envolvidas na questão da furação do conjunto cinta orbital Figura 6 e revestimento, tais obstáculos são explicados na sequência:

Inicialmente a broca toca a primeira chapa usinando sua superfície e a medida em que avança na direção do vetor, forma-se rebarbas na entrada do furo figura 7.a).

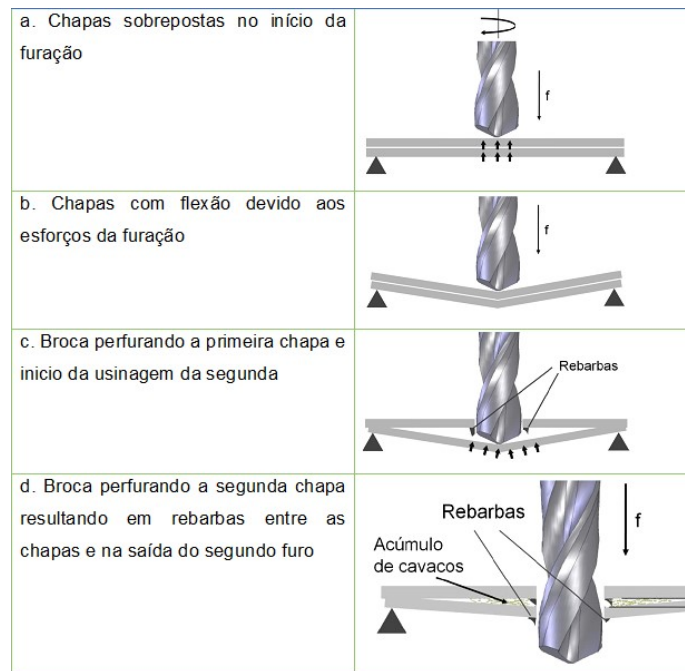
Avançando ainda mais na direção do vetor f , a broca começa a causar a flexão do conjunto formado pelas duas chapas. É importante ressaltar que até este momento ambas as chapas resistem ao avanço da ferramenta.

Ao se aproximar da saída do primeiro furo o material restante a ser usinado à frente da broca apresenta baixa capacidade de resistir às forças de avanço. Esse material começa então a se romper e a primeira chapa, ela irá retornar completamente à sua posição original Figura 7.a). Quando a broca atravessa completamente a primeira chapa, ela irá retornar completamente à sua posição inicial, caso não tenham ocorrido deformações plásticas na chapa, como um todo.

A saída da broca pela primeira chapa geralmente implica em formação de rebarbas na saída do furo. Logo em seguida tem início a usinagem da segunda chapa, que nessa etapa suporta toda a força de avanço que antes era dividida pelas duas chapas. De maneira similar ao ocorrido na primeira chapa, no início da furação da segunda chapa formam-se rebarbas na entrada do furo (Choi, 2004).

Enquanto a segunda chapa é usinada ocorre um acúmulo de cavacos entre as duas chapas. Devido a este fator e à formação de rebarbas entre as chapas, a segunda chapa está flexionada se comparada à primeira que retornou à sua posição inicial. Ao atravessar a segunda chapa a broca forma rebarbas na saída do segundo furo Figura 7 (b).

Figura 7 – Entradas da broca na furação da cinta orbital



Fonte: Terenzi (2010).

Choi et al. (2003) investigaram a formação de rebarbas durante o processo de furação de materiais com múltiplas camadas. Este tipo de material é encontrado em várias partes de aeronaves onde se usam combinações de material como titânio/alumínio, alumínio/compósito, alumínio/titânio/aço ou simplesmente um “sanduíche” formado de alumínio/selante/alumínio.

Nesse mesmo trabalho (Choi, 2003) observou-se a formação de rebarbas na saída do primeiro furo e entrada do segundo furo e, dependendo da plasticidade e da espessura da camada de selante, pode ocorrer de a primeira rebarba não tocar a segunda. Em outro caso podem ser geradas rebarbas que se tocam, sendo possível ainda que a primeira rebarba suplante a segunda. Caso a segunda rebarba seja mais resistente, devido à sua formação ou ao material de composição, a primeira rebarba poderá se enrolar para dentro ou para fora do furo, sendo a primeira situação a mais crítica.

A presença de rebarbas causa regiões com acúmulo de tensão que podem se transformar em pontos de início de trincas extremamente indesejáveis e preocupantes na fabricação de aeronaves. Tal fato é crítico para qualquer componente submetido a esforços dinâmicos cíclicos. Rebarbas e cavacos presentes entre as chapas podem propiciar corrosão entre elas (Totten, 2003). Etapas de rebarbação não agregam valor ao produto e sendo evitadas resultarão em aumento de eficiência e redução de custos no processo, o que vem sendo uma preocupação crescente na indústria aeronáutica (Choi, 2004).

3.3.2 Rebarbas

Rebarbas são pequenas alterações relacionadas ao mecanismo de corte resultando em material fora da peça e causando variação geométrica e dimensional da mesma (Silva, 2009). Alguns autores (Ko, e Dornfeld, 1991) definiram rebarbas como sendo material protuberante indesejável aderido à superfície da peça que se forma à frente do gume da ferramenta devido à deformação plástica que ocorre durante a usinagem.

Os problemas envolvidos com a formação de rebarba e suas consequências indesejáveis foram levantados por diversos autores e analisados em vários processos de fabricação. Segundo Silva et al (2009) rebarbas podem apresentar riscos para os operadores que manuseiam peças que as contém. Além disso, rebarbas que porventura se soltem da peça podem ocasionar o travamento de conjuntos montados. Para Chern (2006) rebarbas são danosas mesmo durante a usinagem, pois se chocam contra o gume da ferramenta causando fissuras na mesma.

Chapas conformadas mecanicamente podem se rasgar devido à presença de rebarbas (Gillespie, 2000). Chapas montadas sobrepostas, caso existam rebarbas nas superfícies entre elas, não possuem um bom posicionamento, o que pode gerar acúmulo de umidade entre estas e corrosões. Outro exemplo são as pequenas rebarbas deixadas em cilindros de motores automotivos após as operações de retificação, ocasionando falhas durante o funcionamento do motor. Rebarbas não identificadas em equipamentos de segurança podem também reduzir o desempenho dos mesmos.

A qualidade das quinas e a presença de rebarbas estão muito relacionadas ao desempenho, segurança, preço e aparência de produtos. Silva et al (2009) afirmam que a etapa de rebarbação, muitas vezes necessária após o processo de fabricação, normalmente não é feita de maneira automatizada, porém manualmente, requerendo um gasto considerável com mão-de-obra, além de tempo consumido. Tarefas dessa natureza, assim como processos de inspeção, não agregam nenhum valor às peças produzidas. Além disso, tempo excessivo leva à geração de um gargalo no processo prejudicando assim toda a produção.

Teixeira, 2011 observou em seus ensaio que em processos de furação de chapas de Liga de Alumínio 7075, utilizando brocas helicoidais de aço rápido a utilização de fluidos de corte ajudam muito na eliminação de rebarbas geradas pelo processo de corte.

3.4 Tipos e Características das Ligas de Alumínio

Grande parte dos metais da tabela periódica pode ser utilizado na composição de ligas de alumínio. Contudo, apenas algumas destas ligas apresentam potencial para comercialização (BRANDT, 1984). Parte das ligas de alumínio pode ser utilizadas em aeronaves e a sua primeira aplicação para esse fim data de 1920 (STARKE e STALEY,

1996).

Algumas das características mais atraentes destas ligas para a aplicação em aeronaves são: boa resistência mecânica, elevada resistência a corrosão e, principalmente, o seu baixo peso específico (BRANDT, 1984).

O cobre é um dos elementos de liga mais importantes para o alumínio, devido à sua solubilidade e efeito de fortalecimento estrutural considerável. Muitas ligas comerciais contêm cobre, seja como principal adição ou entre os principais elementos de liga, em concentrações de 1 a 10%. É usado com frequência em combinação com magnésio.

As ligas de maior interesse na indústria aeronáutica são as tratadas termicamente, como as ligas da série 2xxx (Liga Al-Cu), que são utilizadas em estruturas internas e externas, e as ligas da série 7xxx (Liga Al-Zn-Mg), que, devido à elevada resistência mecânica, são muito utilizadas na estrutura das asas (FERRARI, 2011).

As ligas binárias de alumínio e magnésio são as bases para uma classe importante de ligas não tratáveis pelo calor (ligas séries 5XXX). Embora o magnésio tenha solubilidade substancial em alumínio sólido, as ligas binárias não apresentam características apreciáveis de endurecimento pelas precipitações com concentrações abaixo de 7% de magnésio. Magnésio, no entanto, proporciona um fortalecimento substancial com boa ductilidade como resultado de trabalho a frio, além de excelente resistência à corrosão e soldabilidade (*Aluminum Properties and Physical Metallurgy* (John E. Hatch, p 1-24), 2010).

Ligas Alumínio-Manganês não são tratáveis pelo calor contendo pouco mais de 1% de manganês, por exemplo, liga de 3003, liga comercial importante. O manganês também é amplamente utilizado em quantidades menores como uma adição de liga em ligas tratáveis termicamente, como liga de 2024 com 0,3 à 0,9 % de manganês e as ligas não tratáveis pelo calor, como a liga 5182 com 0,2 à 0,5% de manganês. Em geral, o manganês aumenta a força de ligas forjadas. No entanto, o manganês apresenta-se como um componente intermediário não-dissolvido, nos compostos geralmente têm o efeito de diminuir a ductilidade. Outro efeito importante do manganês no alumínio e suas ligas é reduzir a suscetibilidade à corrosão intergranular ou por tração. (*Aluminum Properties and Physical Metallurgy* (John E. Hatch, p 1-24), 2010).

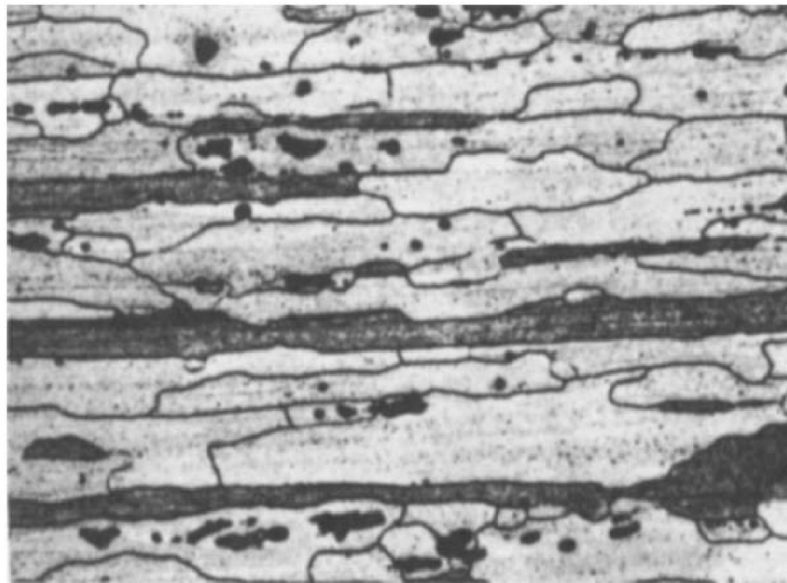
As ligas binárias de alumínio e zinco estavam entre as primeiras ligas de alumínio comercialmente desenvolvidas, mas foram na maioria substituídas por alumínio-cobre e alumínio-silício. Ligas de alumínio e zinco são utilizados principalmente para proteção eletrolítica contra corrosão. Sua plasticidade observada perto da região eutetóide de alumínio e zinco oferece a perspectiva de uma aplicação comercial expandida. Atualmente, o zinco é usado com magnésio e cobre em produtos forjados. (W.A. Backofen et. al 1964, P. 134)

O ferro é a impureza dominante praticamente em todas as ligas comerciais de alumínio. Algum ferro pode ser adicionado intencionalmente, embora o conteúdo total seja geralmente mantido abaixo de 1,0%. Existe a fase eutética em ligas ricas em alumínio a

655 °C com uma composição provável dentro do intervalo de 1,7 a 2,2% de ferro. A fase em equilíbrio com alumínio é geralmente designada como $FeAl_3$ (40,7% de ferro), embora algumas análises de cristais extraídos de ligas estão perto de Fe_2Al_7 (37,3% de ferro). O composto $FeAl_3$ forma-se diretamente a partir do líquido a 1150 °C e não por reação peritética. Em liga rapidamente arrefecida, a metaestável, composto $FeAl_6$ (22,6% de ferro) é produzido (L.F. Mondolfo, 1976, p. 283-285).

O Zircônio, em concentrações de 0,1 a 0,3% *wt* é usado para formar precipitados intermetálicos finos a fim de inibir os fenômenos de recuperação e recristalização, mantendo o controle sobre a microestrutura e conferindo a resistência mecânica desejada (KEY TO METALS, 2010).

Figura 8 – Liga 7075-T6 grãos recristalizados (claro) e fragmentos de grãos não recristalizados que aparecem escuros como resultado da precipitação nos limites dos grãos 455 X



Fonte: Kaiser Aluminium & Chemical Corp (2003).

Observamos na Figura 8 como fica evidente e de fácil percepção as zonas de precipitados, regiões onde os elementos ligantes ficam agrupados. Os precipitados são baixos em teor de cobre, as adições de ferro, manganês e silício interagem entre si e com cobre e o magnésio. O cromo reage com alumínio e magnésio para formar um dispersoide.

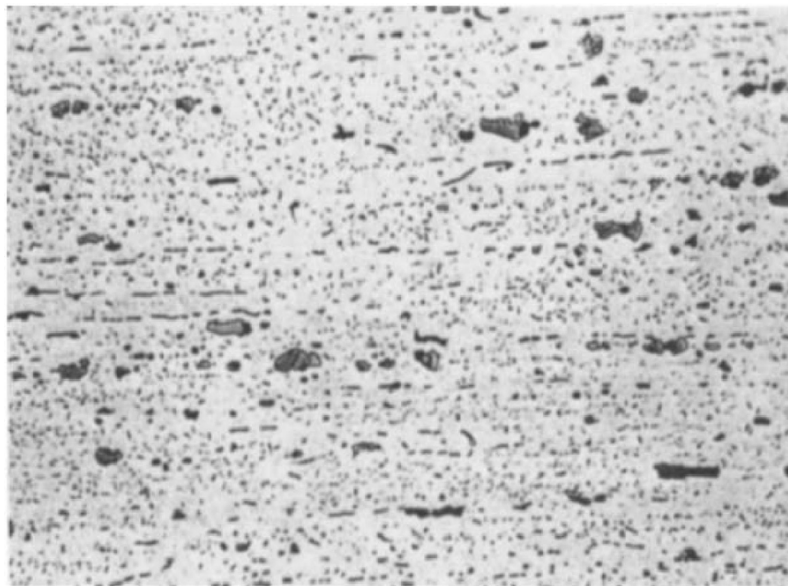
As ligas forjadas são divididas em sete classes principais de acordo com seus principais elementos de liga. Cada classe representa um tipo diferente de microestrutura devido a essas diferenças na constituição da liga. Características microestruturais são descritas para mostrar como a microestrutura desenvolve-se progressivamente a partir do lingote até o final do processo de solidificação.

A liga a ser analisada é da série 7XXX ou ligas alumínio-zinco. O zinco, por si só, é altamente solúvel em alumínio e não exerce influência apreciável na microestrutura de uma liga simples como 7072. No entanto, a classe de liga mais frequentemente encontrada

contém magnésio e cobre, bem como aditivos como cromo, manganês ou zircônio, e o sempre presente ferro e silício.

O recozimento nas ligas tratáveis pelo calor tem um duplo propósito: (1) a remoção do trabalho residual, e (2) a precipitação de solução sólida. O último é realizado por um controle lento do resfriamento e resulta em uma distribuição aleatória de precipitado Figura 9. A presença desta precipitação densa faz a estrutura de grãos de tais ligas ficar difícil de ser visualizada. (American Society for Metals, 1972, p 120-129).

Figura 9 – Amostra AA 7075 recozida mostrando a distribuição aleatória de fases insolúveis intercaladas com partículas de precipitados de Mg Zn, Al, Cu que precipitam solução em sólida durante o arrefecimento lento controlado do recozimento 445x.



Fonte: Kaiser Aluminium & Chemical Corp (2008).

Uma determinada liga não pode ser caracterizada por um único aspecto microestrutural, é preciso interpretar seu histórico de fabricação e os componentes presentes na sua constituição final.

O tamanho inicial das partículas de segunda fase formadas durante a solidificação depende da taxa de remoção de calor. A quantidade de excesso solúvel na fase depende da composição da liga, dentro da especificação dos limites, e sobre o tratamento térmico. A quantidade e o tamanho do dispersoide depende da composição individual e do calor total aplicado. O grau de recuperação, recristalização, tamanho e forma de recristalização dos grãos dependem na maioria de todos os itens acima, bem como de fatores como a taxa de aquecimento.

A compreensão dessas interações é importante para uma interpretação correta das características microestruturais da liga que será analisada a fundo durante desenvolvimento do trabalho.

3.5 Corrosão Intergranular em Liga de 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 (Al_2O_3).

O substrato que se forma, de espessura bem fina, apenas 1 nm, 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 o qual é preciso aliar leveza com resistência. É preciso 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, o qual 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 7075 – T651, com a composição descrita na Figura 10, 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 se entender 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, supõe-se também que para lhe compor é necessário um material forte e leve, é para isso que diversos elementos são adicionados, para aliar 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 para a sua aplicação.

Figura 10 – Composição da Liga de Alumínio 7075 – T651

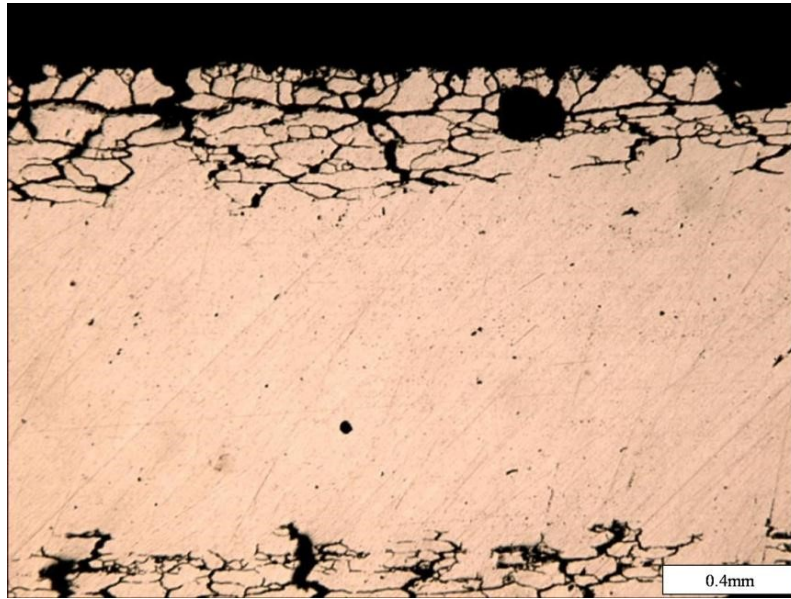
Elemento	Min.	Máx.
Silício	--	0.4
Ferro	--	0.5
Cobre	1,2	2,0
Manganês	--	0,3
Magnésio	2,1	2,9
Cromo	0,18	0.28
Zinco	5.1	6.1
Titânio	--	0.2
Zircônio	--	0.25
Níquel	--	0.05
Outros elementos	--	0,05
Alumínio	Restante	

Fonte: AMS 4050H (2003).

A liga de alumínio tem nos contornos dos grãos os precipitados, os elementos vistos na Figura 10, contendo esta liga o Zinco, Cobre e Magnésio como principais elementos de adição, são esses os influenciadores do processo de corrosão intergranular e posteriormente da fadiga.

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 11. Seu início é decorrente de pequenos pontos que ao desenrolar da corrosão se tornam fissuras mais representativas (Pimenta, 2007).

Figura 11 – 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 submeteram 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.

Segundo Frankel e Wolfe (2004) as fendas formadas pela corrosão não necessitam de esforços externos, a fissuração decorre de um estreito caminho preferencial. Os mecanismos que as 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 solitação 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 trata-se de um material que é amplamente empregado na aviação, na maioria 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.

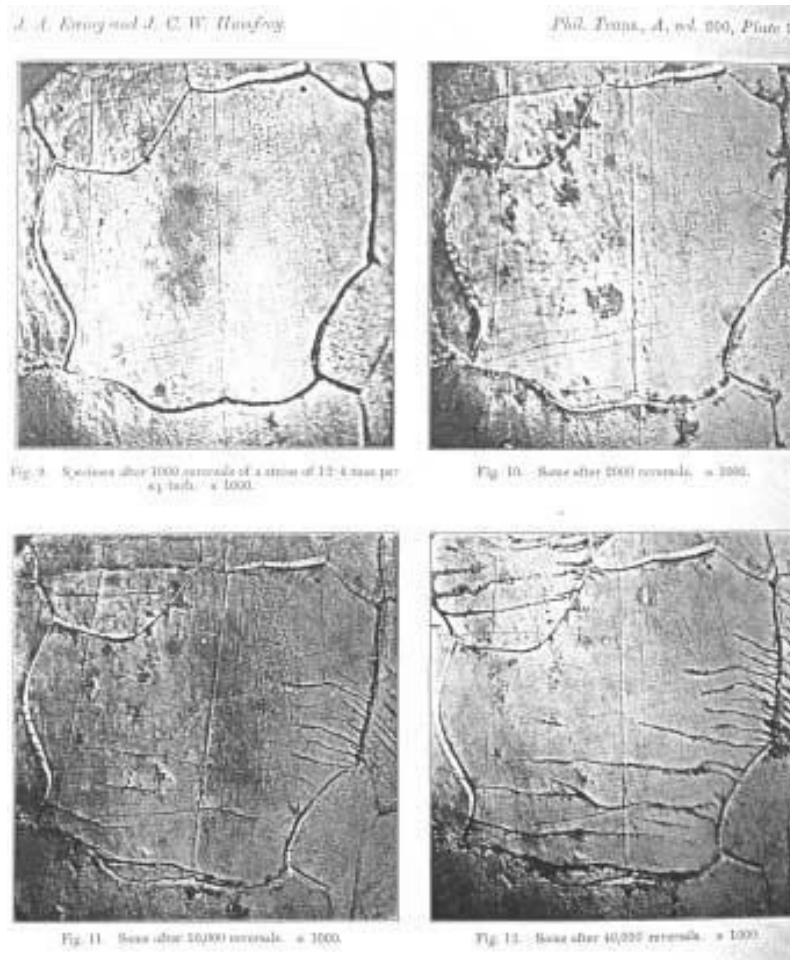
3.6 Estudo da Fadiga

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 12.

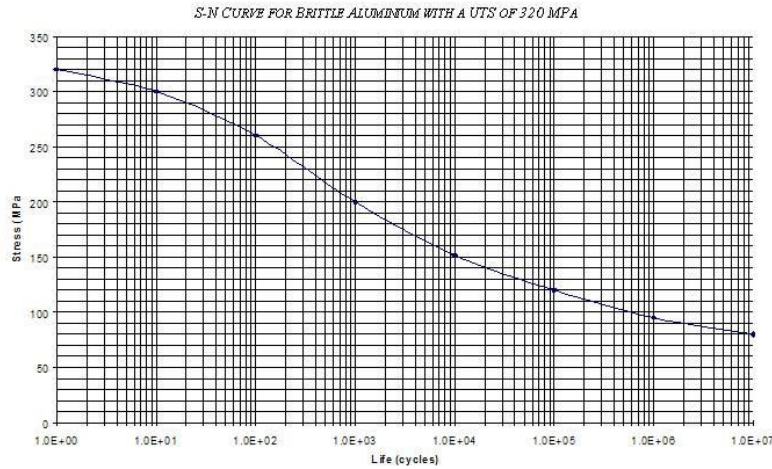
Figura 12 – Progressão das fissuras causadas pela fadiga



Fonte: Ewing & Humphrey (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 13 exemplifica isto, ela traz tensão versus número de ciclos.

Figura 13 – Curva de análise de fadiga



Fonte: Forum performance boats (2009).

3.7 Condições de Intensificação da Corrosão Intergranular

São várias as consequências geradas pela corrosão intergranular, ela desencadeia uma série de problemas dentro das estruturas principais de uma aeronave, como mostra a Figura 14. O alumínio está presente em inúmeras partes de um avião e na região da fuselagem terá grande importância, tendo em vista que é esta a estrutura principal. Compreender quais esforços mecânicos uma aeronave sofrerá, é 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 à 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, 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 consequências estruturais. Os constantes pousos e decolagens geram essas tensões, que vão variar conforme 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 14 – 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 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.

As variações cíclicas que a fuselagem sofre gera fadiga estrutural e que é monitorada pela manutenção constantemente, um componente estrutural sob os efeitos da corrosão intergranular tende a fraturar-se, poder analisar os efeitos de intensificação e qualificar a previsibilidade para a vida útil é de grande valia para qualificação dos processos de manufatura e aplicação dos componentes estruturais aeronáuticos.

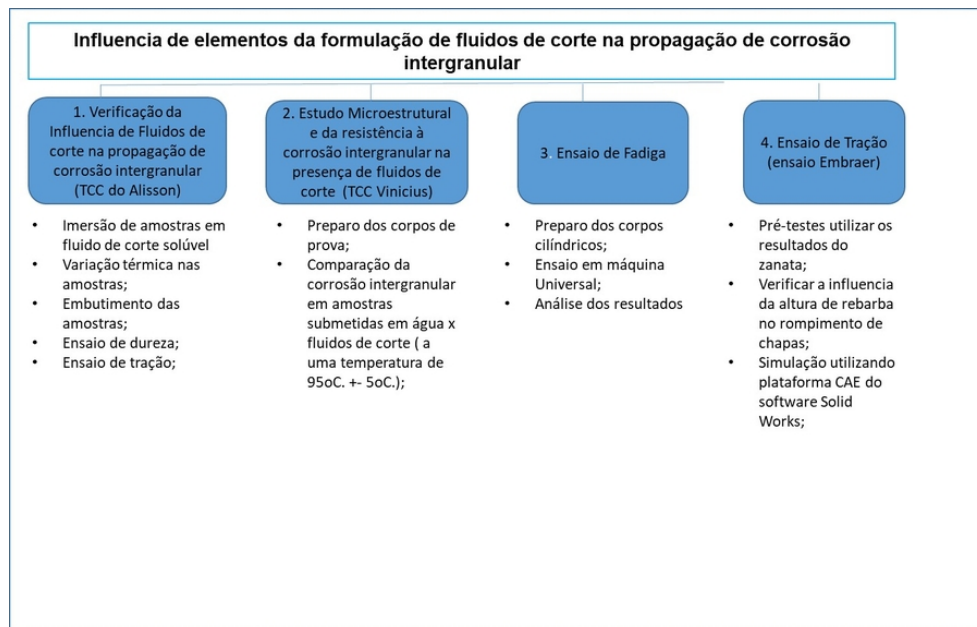
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos descrevem 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. Para realização desse trabalho os ensaios foram divididos em 4 experimentos:

- 1) Ensaios físico-químicos para verificar a influência dos fluidos de corte na propagação de corrosão intergranular;
- 2) Estudo Microestrutural e da resistência à corrosão intergranular na presença de fluidos de corte;
- 3) Ensaio de Fadiga;
- 4) Ensaio de Tração.

A seqüência dos experimentos realizados podem ser melhor observados por meio da Figura 15.

Figura 15 – Sequência dos experimentos realizados



Fonte: Autoria própria.

4.1 Verificação da Influência de Fluidos de Corte na Propagação de Corrosão Intergranular

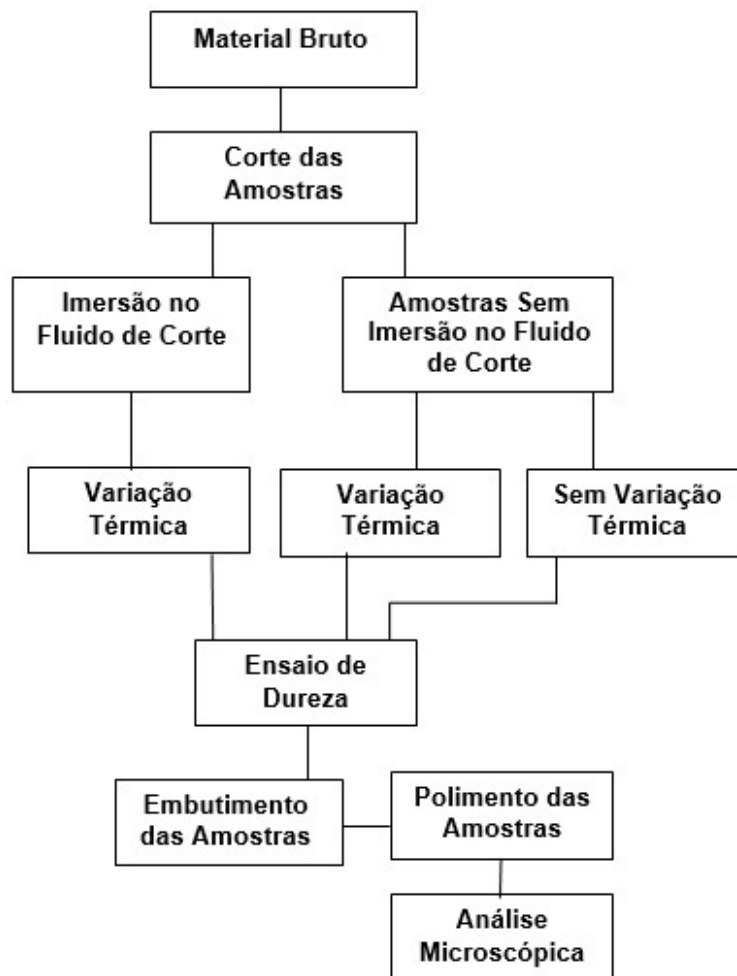
A metodologia descreve as etapas necessárias para a realização da pesquisa, detalhando as atividades realizadas para a construção dos resultados relacionados ao fluido

de corte. O desenvolvimento é descrito na ordem de realização das atividades, citando o “passo a passo”, de cada uma delas.

4.1.1 Formas de preparo e métodos de análise dos ensaios

A figura 16 exemplifica as fases de preparação para a realização do ensaio de dureza e a análise microscópica das amostras.

Figura 16 – Fluxograma das etapas de preparação e análise das amostras.



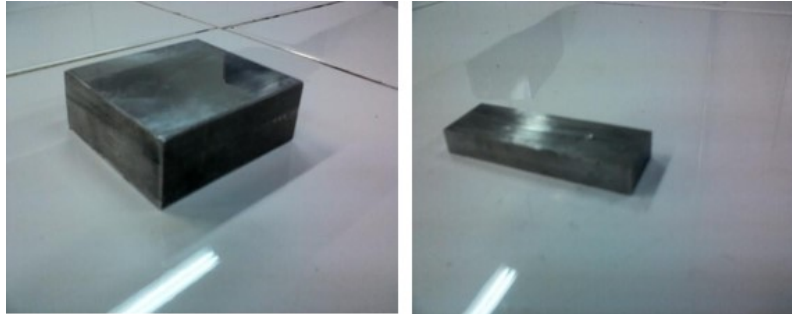
Fonte: Autoria Própria.

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 às variações analisadas nesta pesquisa. A figura 17 mostra em (a) o material bruto e em (b) peças cortadas em partes retangulares.

Figura 17 – a) b) 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 durante 15 dias 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 18 – a) Preparação e o corpo de prova pronto para o ensaio de tração



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – b) Preparação e o corpo de prova pronto para o ensaio de tração

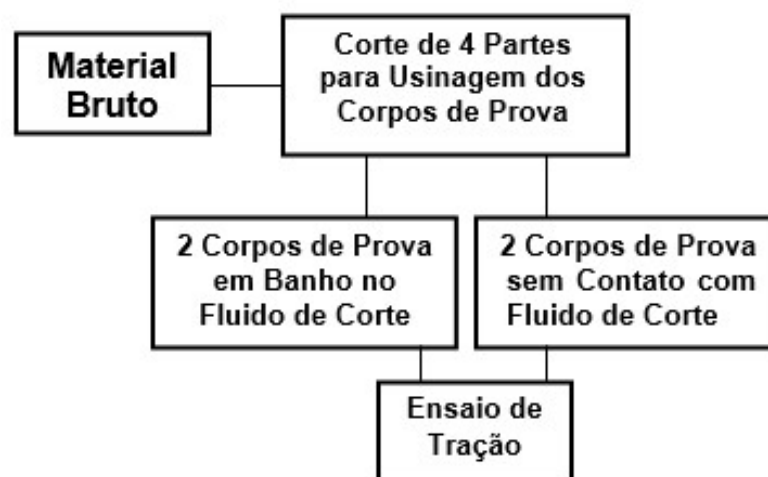


Fonte: Autoria própria.

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 20 mostra os passos para a realização do teste de tração

Figura 20 – Fluxograma com as etapas de preparação do ensaio de tração



Fonte: Autoria Própria.

Os corpos de prova da figura 21, 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 21 – 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 juntamente 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 sendo 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 22. O objetivo foi avaliar a influência do parâmetro da temperatura no desenvolvimento da corrosão e conseqüentemente sua alteração na resistência superficial.

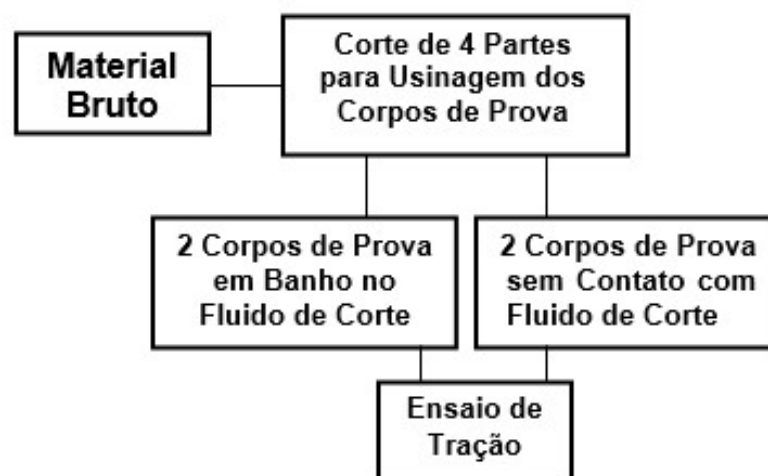
Figura 22 – Forno industrial utilizado no aquecimento das amostras



Fonte: Autoria própria.

Após 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 a 400 vezes para obtenção das imagens apresentadas

Figura 23 – 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 24. 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 24 – Máquina utilizada para realização do embutimento



Fonte: Autoria própria.

Após o polimento têm-se amostras prontas para as análises, a figura 25 apresenta como ficaram as amostras retangulares após serem cortadas em fragmentos, embutidas e polidas, dessa forma a superfície poderá ser analisada na iniciação esperada da corrosão.

Figura 25 – Amostra pronta embutida

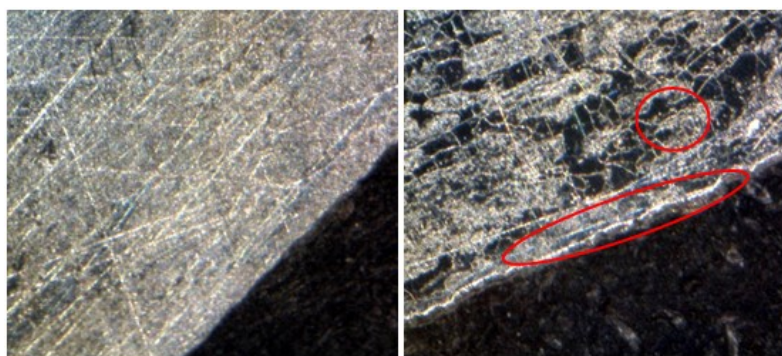


Fonte: Autoria própria.

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

Comparando às diferenças presentes com e sem adição de ácido fluorídrico em cada amostra percebe-se a diferença de visualização. A figura 26 traz às duas situações, em (b) a adição do ácido acentuou a corrosão intergranular, por isso não foi utilizado.

Figura 26 – a) e b) Imagem microscópica com e sem aplicação de ácido fluorídrico (300 e 380X)



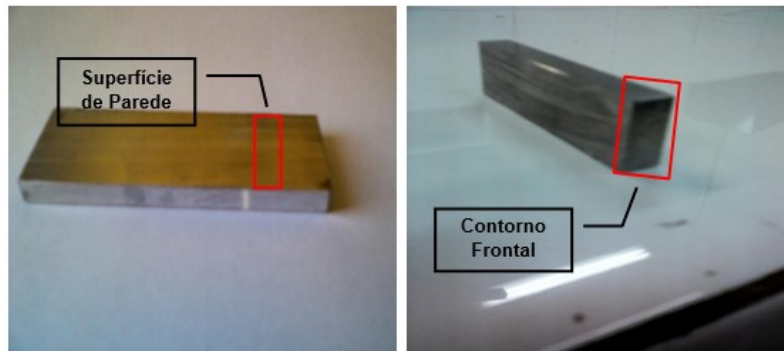
Fonte: Autoria própria.

A localização dos pontos de análise da imagem foi definida em dois setores da amostra, os quais são mostrados na figura 27, ela apresenta esses dois pontos 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 27 (b). A região circulada em (a) é para ver a distribuição da corrosão pela superfície, como ocorre sua distribuição.

Figura 27 – a) e b) Pontos de análise microscópica da amostra



Fonte: Autoria própria.

A superfície de parede em (a) e o contorno frontal em (b), ambas da figura 27, permite essa observação de desencadeamento corrosivo para que se possa comparar em dois pontos distintos de uma mesma amostra a distribuição da corrosão intergranular.

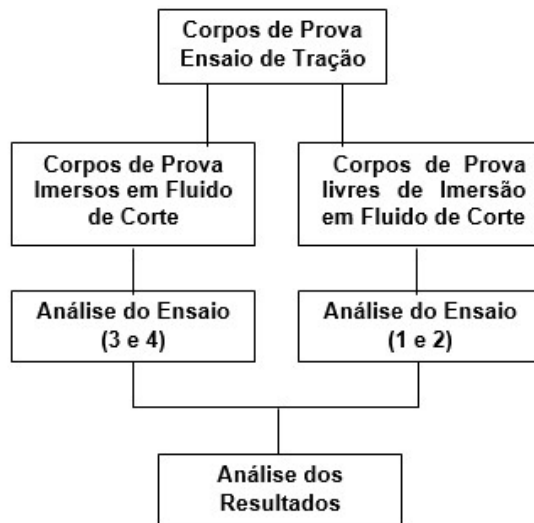
4.1.2 Descrição do ensaio de tração

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 29. 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 28 – Fluxograma do ensaio de tração



Fonte: Autoria própria.

Figura 29 – Máquina utilizada para a realização do ensaio de tração

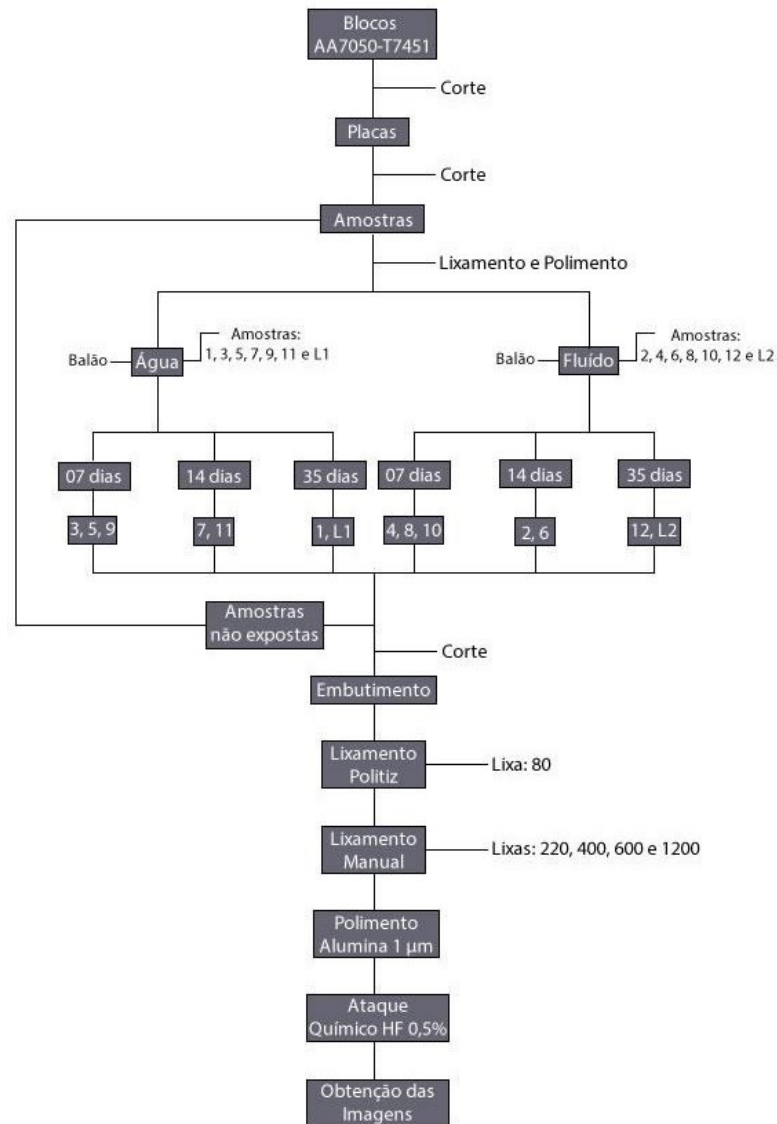


Fonte: Autoria própria.

4.2 Estudo Microestrutural e da Resistência a Corrosão

Para uma análise reduzida da metodologia a seguir, na Figura 30 é apresentado um fluxograma com os passos realizados durante a execução do presente projeto.

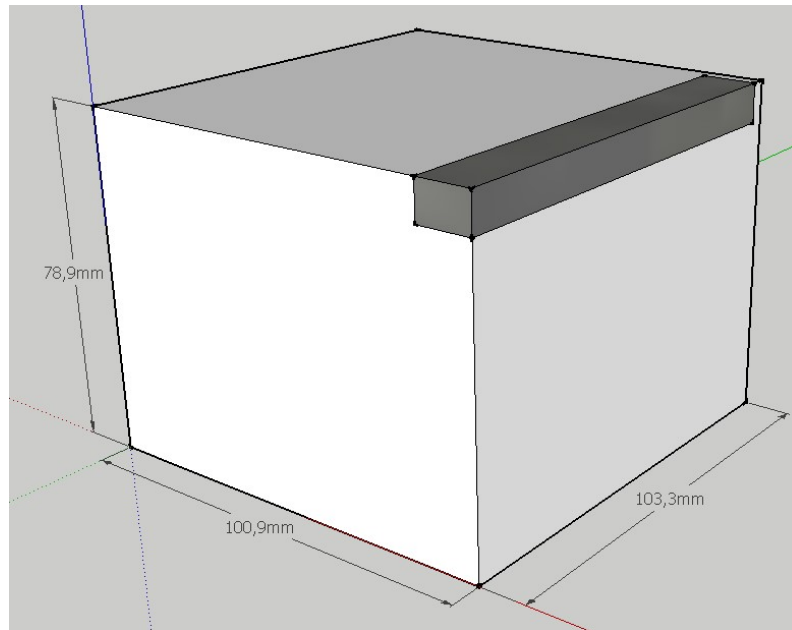
Figura 30 – Fluxograma do procedimento de realização do experimento



Fonte: TCC Vinicius Sichieri (2015).

4.2.1 Metodologia

Inicialmente as amostras foram preparadas a partir de duas peças da liga AA7050-T7451 com dimensões de 100,9x103,3x78,9 mm referentes à largura, comprimento e altura respectivamente. As peças foram cortadas em barras finas de 9,0 mm de espessura, 103,3 mm de comprimento e 12 mm de largura, como é mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Dimensões da peça de alumínio

Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

Para simular a condição de usinagem, que, além dos esforços, se restringe ao calor gerado na superfície devido ao atrito causado pela ferramenta de corte e ao contato entre peça e fluido de corte, um sistema foi elaborado com a finalidade de fornecer calor à liga de alumínio e, ao mesmo tempo, mantê-la em contato direto com o fluido de corte.

A Figura 32 mostra o sistema montado a partir de quatro mantas aquecedoras, quatro torres de destilação, quatro balões de 250 mL, mangueiras de PVC para fornecer água ao sistema de refluxo, filme de PVC para fazer a vedação das partes encaixadas, papel alumínio para retenção de calor na manta, além de quatro suportes e quatro garras para sustentar o sistema em sua forma operante. As mangueiras de PVC foram ligadas a torneiras a fim de manter um sistema de refluxo, fazendo, dessa forma, com que não houvesse variação na quantidade de água ou fluido de corte presente em cada balão.

Para o aquecimento do sistema com todos os fluidos, foi estabelecido um valor nos controladores eletrônicos das mantas aquecedoras que possibilitassem uma temperatura de 95 °C, em média, tendo variação de 5º para mais e para menos.

Figura 32 – Sistema de refluxo para simulação de corrosão.



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

- 1) Manta aquecedora LUCADEMA 1000;
- 2) Filme de PVC;
- 3) Torre de destilação;
- 4) Suporte;
- 5) Mangueiras de PVC;
- 6) Garras.

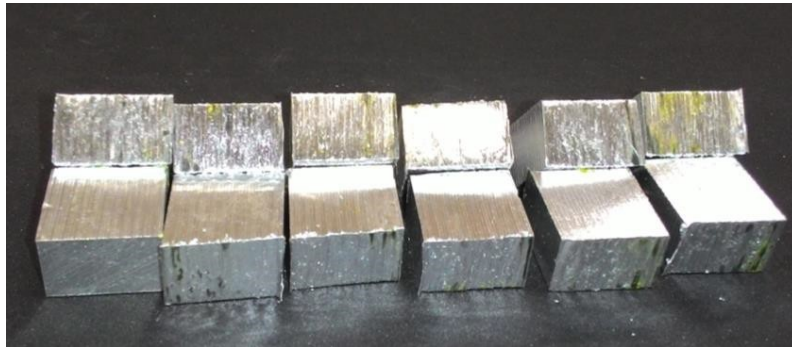
As amostras foram contadas a partir de um tarugo da liga de Al. Primeiramente, foram cortadas barras do tarugo, sempre no mesmo sentido, conforme é mostrado na Figura 33, e, depois, cada barra foi cortada em pequenas partes de 10,0x10,0x9,0 mm utilizando uma serra em arco. No total foram preparadas 34 amostras nas medidas citadas, com mostra a Figura 34.

Figura 33 – Barras pré-corte das amostras



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

Figura 34 – 12 amostras após o corte



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

Cada pequena parte cortada do tarugo foi devidamente lixada e polida a fim de eliminar qualquer imperfeição que pudesse aumentar a susceptibilidade à corrosão em uma determinada região, como mostra a Figura 35. O procedimento de polimento e lixamento foi realizado para todas as amostras submetidas à corrosão. A fim de numerar cada amostra foi utilizada uma retífica para fazer pequenas marcas em uma das superfícies da amostra que não seriam utilizadas para análise, como mostra a Figura 36.

Figura 35 – Amostras polidas e prontas para serem inseridas no sistema corrosivo



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

Figura 36 – Amostra devidamente marcadas



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

Dentro de cada balão foram colocadas seis amostras, sendo que as amostras denominadas com números ímpares foram postas em contato apenas com água e as amostras pares em contato com o fluido de corte.

Na constituição do fluido de corte, para se assemelhar ao que é usado comercialmente, foi necessário diluir o concentrado de óleo de pinhão-manso mais aditivos em água. Usualmente se trata de uma solução de 10%, em volume, e, do óleo mais aditivos na água.

O experimento permitiu que balões de 250 mL fossem utilizados devido ao pequeno tamanho das amostras. Não foi necessário completar o volume total, logo, trabalhou-se com 200 mL de solução. Sendo assim, em dois dos balões estava presente apenas água e nos outros dois o fluido de corte. A Figura 37 mostra as amostras inseridas nos balões.

Após uma semana de funcionamento foi verificado junto à literatura que poderia de haver interferência na corrosão intergranular nas amostras que estavam em contato diretamente uma com as outras através do efeito de “Polarização Por Concentração”. Sendo assim, cada amostra foi ensaiada individualmente, como mostra a Figura 38.

Figura 37 – Seis amostras nos balões com fluido de corte, à esquerda, e seis amostras no balão com água, à direita.



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

Figura 38 – Uma amostra no balão com fluido e corte, a esquerda, e uma amostra no balão apenas com água, a direita.



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

Após 35 dias de experimento um acidente foi registrado: um problema elétrico danificou o controlador térmico de duas das mantas aquecedoras, acarretando aquecimento descontrolado das resistências, superaquecendo o sistema e danificando todo o equipamento.

A Figura 39 apresenta o resultado causado pelo superaquecimento. À esquerda houve degradação do fluido de corte e total preenchimento do balão por material orgânico carbonizado, e, à direita, como havia somente água, houve total evaporação da mesma.

Mesmo após o problema, o cronograma de exposição das amostras ao fluido de corte foi cumprido.

Figura 39 – Avaria no equipamento



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

Após o tempo determinado de exposição ao fluido, cada amostra foi retirada dos balões, e, então, serrada manualmente (com arco de serra) num das seções transversais, longe das marcações de identificação, como é mostrado na Figura 40. Esse processo de corte foi realizado com muito esmero e de forma lenta para não causar avarias, ou deformações, nas amostras, que poderiam interferir nos resultados de corrosão.

Figura 40 – Amostras serradas em seção transversal após período de corrosão



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

Conforme foi previamente descrito, períodos diferentes foram escolhidos para retirada de amostras e posterior comparação. A Figura 1 reúne de forma sucinta os períodos e condições de exposição de cada amostra submetida ao sistema.

Tabela 1 – Período de retirada de cada amostra

Amostra	07 dias		14 dias		35 dias	
	Água	Fluido	Água	Fluido	Água	Fluido
1					X	
2				X		
3	X					
4		X				
5	X					
6				X		
7			X			
8		X				
9	X					
10		X				
11			X			
12						X
L1*					X	
L2**						X

Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

****Amostras isoladas das demais, postas separadas em um balão.**

O passo subsequente foi embutir as amostras na Embutidora Arotec PRE30Mi SMX136. Três amostras não imersas nos meios corrosivos também foram embutidas com a finalidade de servirem de comparativo quanto à microestrutura da liga isenta do efeito de corrosão e temperatura. Sendo assim, foram embutidas 17 amostras no total.

Para melhor entendimento, uma nomenclatura foi dada às amostras a fim de identificá-las quanto ao meio que esteve imersa e por quanto tempo, como nos exemplos “01A35” e “08F07”; onde “01” e “08” correspondem ao número da amostra, “A” representa “Água” e “F” representa “Fluido de Corte” como meio de imersão; e, “35” e “07” representam o número de dias que a amostra foi submetida ao processo de corrosão. Ocorre exceção na amostra isenta aquecimento e meio corrosivo, chamada de RE-00.

Para revelar a microestrutura do material e, conseqüentemente, o efeito do fluido de corte sobre a corrosão intergranular das ligas, as amostras foram atacadas quimicamente com o uso de ácido fluorídrico. Devido à grande periculosidade dessa substância, seguindo a literatura, foi adotada uma concentração de 0,5% de HF diluído em água (ROHDE, 2010). Sendo assim, diminui-se o risco de acidente mantendo a efetividade do ataque químico apenas submetendo a amostra por um maior período em contato com o ácido. As amostras foram submetidas ao ácido por 2 min e 30 segundos, e posteriormente, foram lavadas com álcool isopropílico e secadas usando um secador com ar frio. Na Figura 41 é mostrado as

amostras embutidas e atacadas quimicamente.

Figura 41 – As 17 amostras após ataque químico



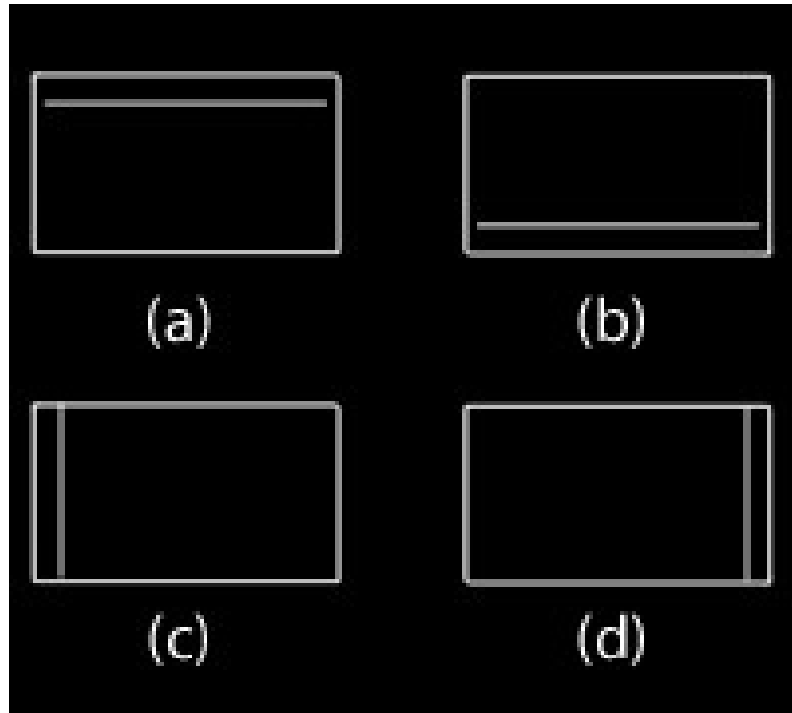
Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

A análise das superfícies das amostras foi realizada utilizando o Microscópio Óptico Carl Zeiss Microimaging GmbH, fornecendo as imagens com aumentos e resolução necessárias para a análise da corrosão intergranular proposta nesse trabalho.

Foi adotado um critério de imagens com aumento de 50 e 100 vezes para o centro da amostra a fim de revelar a microestrutura geral e, para cada borda da amostra, parte essencial de análise da corrosão intergranular, aumentos de 200, 500 e 1000 vezes.

Um sistema de referência foi adotado para indicar como as amostras foram analisadas e assim estabelecer um padrão, tornando plausível a comparação entre as bordas. As bordas com linhas duplas representam a borda real analisada no momento de captura das imagens. Os símbolos usados são expostos na Figura 42.

Figura 42 – Sistema de referência para identificação da borda analisada: a) Superior, b) Inferior, c) Esquerda e d) Direita.



Fonte: Vinicius Sichieri, corrosão intergranular (2015).

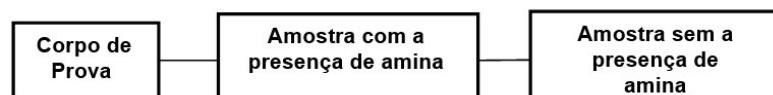
4.3 Ensaio de Fadiga

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 intuito aqui é analisar a divergência na resistência com e sem amina.

Os ensaios de fadiga foram realizados de modo avaliação qual a resistência dos corpos de prova após serem submetidos em contato com fluidos de corte de diferentes formulações, de modo a verificar qual a resistência do material submetido a um número de ciclos.

Os ensaios de fadiga seguiram a sequência conforme ilustrado na Figura 43 .

Figura 43 – Sequência do ensaio de fadiga.

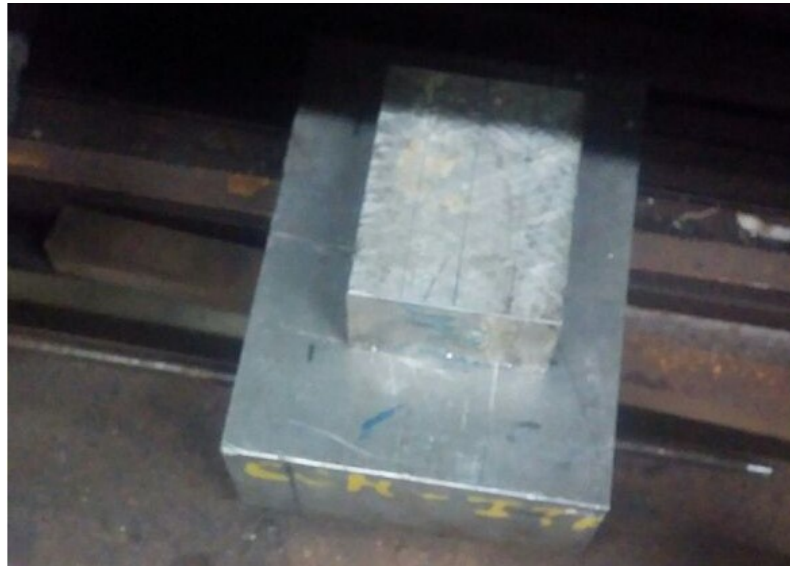


Fonte: Autoria própria.

4.3.1 Forma de Preparo e Métodos de Análise dos Ensaio

Os corpos de prova a serem analisados são da liga de alumínio 7075 – T651 Figura 44 (a). Foram obtidos por usinagem em um torno CNC ROMI Centur 30D, conforme mostrado na figura 45 (b).

Figura 44 – (a) Material bruto AA 7075



Fonte: Autoria própria.

Figura 45 – (b) usinagem dos corpos de prova por torneamento



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram usinados em um total de 21 corpos de prova conforme a norma E606 para ensaio de fadiga em máquina rotativa.

Após a usinagem das 21 amostras, realizou-se o polimento para proporcionar uma rugosidade satisfatória, até atingir um aspecto de espelhamento na superfície, para que atenda os requisitos superficiais do ensaio de fadiga.

Figura 46 – 21 corpos de prova que foram usinados pelo torno CNC



Fonte: Autoria própria.

A primeira etapa do polimento é a limpeza das peças com pano de microfibra e aplicação das lixas de granulometria de 1500.

Figura 47 – Corpo de prova após a usinagem



Fonte: Autoria própria.

A primeira etapa permitiu reduzir os maiores picos e as variações mais grosseiras do processo de usinagem deixando as amostras, em um estado mais fácil de polimento, preparando para a segunda etapa do processo de polimento das amostras.

Figura 48 – Lixa 1500 para a primeira etapa do polimento



Fonte: autoria própria.

A segunda etapa consiste na aplicação da lixa de granulometria 2000, sua baixa retirada de material permite homogeneizar a superfície para que as etapas menos abrasivas do processo possam ser aplicadas em um período menor de tempo.

A terceira etapa consistiu na aplicação das escovas de polimento, disco fabricado com 40 folhas/camadas de tecido, em média a espessura é de 2,5 cm (5 polegadas), para

esta e a quarta etapa de polimento é necessário utilizar pasta de polir, que realizou o trabalho abrasivo, ou seja, a retirada de material, microscópica.

A pasta sólida abrasiva foi aplicada com o disco em rotação, após o acúmulo de material nas escovas pode-se realizar a sequência de polimentos nas amostras.

A quarta etapa consistiu na aplicação das escovas de polimento, disco fabricado com 40 folhas/camadas de tecido de algodão, em média a espessura é de 2.5 cm (5 polegadas), esta foi uma etapa de finalização para dar um aspecto espelhado na superfície, que representa a baixa rugosidade na superfície das amostras.

Após a finalização das etapas de polimento o aspecto obtido é de uma superfície homogênea e sem riscos visuais, observado na figura 49, onde as amostras já estão aptas para serem expostas em fluido de corte e serem ensaiadas.

Figura 49 – Corpo de prova após o polimento final



Fonte: Autoria própria.

As amostras foram separadas figura 50 e numeradas de 1 a 21 desde o início do polimento e depois subdivididas para serem expostas nas três variáveis observadas.

Figura 50 – Separação e numeração dos 21 corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

As amostras foram expostas em diferentes variáveis, três situações onde serão comparados os comportamentos diante dos fatores de análise. As amostras foram expostas a dois tipos de fluidos de corte e o terceiro tipo sem nenhuma exposição, foi considerado como amostra de comparação, em branco.

Foram utilizados dois óleos de corte, o fluido solúvel de base mineral fornecido pela *Petrofer*, Emulcut 160 e o outro Emocult 6501_M, óleos com e sem a presença de amina em sua composição, a concentração da emulsão foi de 20 /1, vinte partes de água para uma de óleo.

A primeira etapa foi o preparo de todas as amostras, em seguida realizou-se a imersão das amostras que foram expostas ao fluido de corte, dois tipos, após esse período de exposição, será realizado o ensaio de fadiga nas amostras que ficaram imersas e nas amostras em branco.

Figura 51 – 7 corpos de provas após exposição da emulsão em fluido de corte com amina



Fonte: Autoria própria.

As amostras da figura 51 e 52 ficaram 70 dias no processo de imersão intermitente, onde ficavam 16 horas imersas e 8 horas secando em temperatura ambiente, com média de 25 °C.

Após o período de exposição os dois tipos de amostras com 7 em cada grupo se juntou ao grupo de 7 amostras que não foram expostas em nenhum tipo situação que gerasse estímulos na corrosão intergranular.

Figura 52 – 7 corpos de provas após exposição da emulsão de fluido de corte sem amina



Fonte: Autoria própria.

O ensaio de fadiga foi realizado com as 21 amostras das três condições observadas neste trabalho, o ensaio de fadiga rotativo será realizado para observar a diferença de resistência entre as situações propostas, o local onde dos ensaio foi na USP de São Carlos.

A Tabela 2 mostra o período de retirada de cada amostra, estruturando as divisões de amostragem.

Tabela 2 – Período de retirada de cada amostra

Amostras	Tempo de Exposição	Fluído 1	Fluído 2	Amostas em Branco
1	70 Dias Com ciclos de 16/8	<i>Petrofer</i> Emulcut 160		
2	70 Dias Com ciclos de 16/8		<i>Petrofer</i> Emulcut 6501M	
3	Sem exposição			Amostras polidas e embaladas sem exposição

Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova confeccionados para o ensaio de fadiga, ficaram 70 dias 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.

4.3.2 Descrição do ensaio de fadiga

O ensaio foi realizado em máquina hidráulica que realiza fadiga axial, com razão $R = 0,1$, em equipamento universal de ensaios mecânicos marca MTS modelo 810, com 250

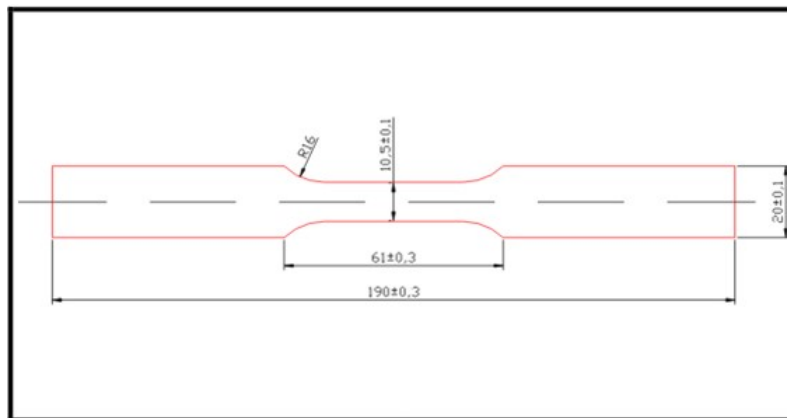
kN de capacidade máxima de carga para operação.

Especificações:

- Tensão Média aplicado no ciclo: (240-280) MPa;
- Número de cilos esperado: (10^4 - 10^5);
- Frequência: (700 - 900) Hz;
- Extensômetros MTS de 25 mm;
- Material da amostra: Alumínio 7075;

Na Figura 53 podemos observar uma esquematização para um corpo de prova aplicado no ensaio de fadiga.

Figura 53 – Desenho corpo de prova



Fonte: Autoria própria.

Figura 54 – Máquina universal para ensaio de fadiga



Fonte: Banco de imagens google magens.

Por meio do ensaio de fadiga foi possível obter as propriedades mecânicas desta liga de alumínio 7075, antes e depois da imersão em fluido de corte. A análise dos resultados obtidos com as amostras ensaiadas permitiu adquirir o limite de resistência à fadiga. Com os dados retirados realizou-se uma comparação entre a diferença de resistência mecânica dos corpos deixados em banho no fluido com e sem amina e sem nenhuma exposição, na Figura 54 podemos visualizar um exemplo de equipamento que permitiu realizar os ensaios abordados nessa secção.

4.3.3 Análise dos resultados de fadiga

Foi feito o ensaio de fadiga, mas os resultados apresentados não foram suficientes para chegar a uma conclusão, os corpos de prova acabaram não podendo ser aproveitados como se esperava, dessa forma realizou-se o ensaio de tração de chapas com variações de furacões e alturas de rebarba, a ideia era agregar valor ao estudo por meio de uma análise complementar.

Nos ensaios chegou-se aos resultados que aparecem na tabela 3 .

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de Fadiga

Al 7050 T7 R=0,1 (ensaio de fadiga)				
Condição 1 (Fluido sem amina)				
CP	Diâmetro (mm)	Vida	σ (MPa) —(0,1)R	OBS
1	7,26	114366	350 MPa	Fraturou na garra
2	7,2	139632	350 Mpa	–
3	7,46	422355	300 Mpa	Fraturou na garra
4	7,37	565331	300 Mpa	Fraturou na garra
5	7,47	623032	250 Mpa	Fraturou na garra

6	7,5	552451	250 Mpa	Fraturou na garra
Condição 2 (Fluido com amina)				
CP	Diâmetro (mm)	Vida	σ (MPa) —(0,1)R	OBS
1	7,51	32212	350 MPa	—
2	7,3	12	350 Mpa	Rompeu com 12 ciclos
3	7,52	48556	350 Mpa	—
4	7	120792	300 Mpa	—
5	7,3	269286	300 Mpa	Fraturou na garra
6	7,24	358443	250 Mpa	Fraturou na garra

Condição 3 - Teste de garra, fraturou no meio de fora a fora e foi descartado.

Fonte: Autoria própria.

4.4 Descrição do Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado primeiramente utilizando a plataforma CAE do software SolidWorks com objetivo de melhor entender o comportamento de chapas do material Alumínio 7075-T6 ao teste de tração em modelo digital que se aproxima de um acontecimento real de esforços nas chapas. Juntamente da apresentação, estão afixadas imagens que visam ilustrar o comportamento da chapa via *software*, assim como discussão dos dados obtidos e soluções para problemas na chapa.

Para início apresenta-se a tabela 4 com os dados físicos da chapa analisada, fornecidas pelo *software* utilizado.

Tabela 4 – Dados físicos da Chapa 1

Propriedades volumétricas	
Massa	0.0996583 kg
Volume	3.54656e-005 m ³
Densidade	2810 kg/m ³
Peso	0.976652 N

Propriedade do material

Nome	7075-T6, Chapa (SS)
Tipo de modelo	Isotrópico linear elástico
Critério de falha predeterminado	Desconhecido
Limite de escoamento	5.05e+008 N/m ²
Resistência à tração	5.7e+008 N/m ²
Módulo elástico	7.2e+010 N/m ²
Coeficiente de Poisson	0.33
Massa específica	2810 kg/m ³
Módulo de cisalhamento	2.69e+010 N/m ²

Coefficiente de expansão térmica

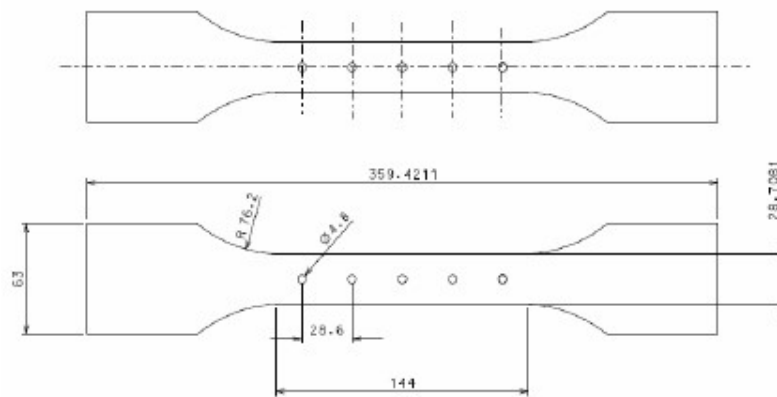
2.4e-005 /Kelvin

Fonte: SolidWorks 2013,(dados recebidos do software).

Os ensaios físicos foram realizados em uma máquina de ensaios universal pertencente ao laboratório de materiais da UTFPR- campus Londrina.

Os corpos de prova eram chapas de alumínio com as dimensões de 144 mm x 63 mm, com 5 furos de diâmetro de 4,8 mm localizados na região do corpo, conforme Figura 55.

Figura 55 – Geometria do corpo de prova para o ensaio de tração



Fonte: Autoria própria.

4.4.1 Obtenção dos resultados

Após uma análise das rupturas causados nas chapas após os testes de tração, pode se observar que as rupturas se concentraram nos furos de fixação dos rebites da montagem das duas chapas, como mostrado na figura 56 e 57.

Figura 56 – Vista superior da montagem entra a chapa 1 e 2



Fonte: Autoria própria.

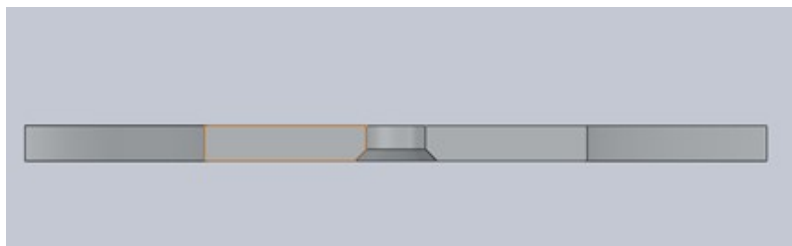
Figura 57 – Vista inferior da montagem entra a chapa 1 e 2



Fonte: Autoria própria.

Essa ruptura ocorreu nesse ponto pela concentração de carga devido à geometria da secção do furo da chapa superior como mostrado na figura 58, assim havendo assim um “rasgamento” da chapa como mostrado na figura 56 e 57.

Figura 58 – Vista da geometria da secção do furo chapa superior



Fonte: Autoria própria.

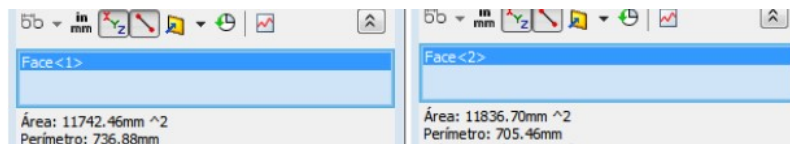
Por esse fator as análises computacionais se iniciaram pela chapa superior da montagem aqui denotada de chapa 1 e a chapa inferior como chapa 2 para facilitar

entendimento durante a discussão dos dados obtidos.

4.4.2 Análise computacional das chapas

Após verificar o histórico de comportamento das chapas via teste de tração laboratorial executou-se um teste computacional para melhor entendimento dos componentes separadamente. Os testes foram iniciados pela chapa 1, pois as características da ruptura apresentavam uma que a concentração de cargas estava ocorrendo com maior incidência nessa chapa devido a sua geometria apresentar diferença de área entre as suas áreas superior e inferior, isso devido a geometria da secção do furo de alojamento do rebite, como mostrado na figura 59.

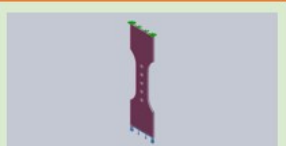
Figura 59 – Comparativo entre áreas da chapa 1



Fonte: Autoria própria.


O teste computacional feito consiste na aplicação de uma geometria fixa em uma das faces da chapa e aplicação de uma carga de $1 \times 10^6 \text{ N}$ na face contrária a da geometria fixa aplicada como mostrado nos quadros 1 e 2 gerados pelo software.

Figura 60 – Força aplicada (adaptado)

Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Força-1		Entidades: 1 face(s) Tipo: Aplicar força normal Valor: 100000 N

Fonte: Autoria própria.

Figura 61 – Tipo de fixação (Adaptado)

Nome do acessório de fixação	Imagem de acessório de fixação	Detalhes de acessório de fixação			
Fixo-1		Entidades:	1 face(s)		
		Tipo:	Geometria fixa		
Forças resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Força de reação(N)	-0.308655	99976.8	6.90748	99976.8	

Fonte: autoria própria.

Na tabela 5 e figura 62 seguem as informações da malha gerada pelo *software* para as análises.

Tabela 5 – Informações de malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha com base em curvatura
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho máximo de elemento	0 mm
Tamanho de elemento mínimo	0 mm

Qualidade da malha	Alta
Total de nós	16424
Total de elementos	8462
Proporção máxima	6.1643
% de elementos com Proporção < 3	98
% de elementos com Proporção < 10	0
% de elementos distorcidos (Jacobiana)	0
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss):	00:00:02
Nome do computador:	HALL-13

Fonte: Autoria própria.

Após as análises chega-se ao modelo conforme mostradona Figura 62, onde é possível dar sequência nas simulações e poder fazer as análises com base na metodologia proposta.

Figura 62 – Modelos de malha gerada pelo software



Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados obtidos foi possível realizar uma montagem onde estão reunidos todos os principais dados analisados e que contribuíram para as conclusões do trabalho, os tópicos subsequentes trarão essas informações para estruturar a argumentação posterior .

5.1 Simulação Computacional

A partir dos dados obtidos foi possível gerar os resultados que confirmam a suposição feita anteriormente onde por um diagrama de cores realizado a partir da análise de tração computacional da chapa pode se identificar os pontos de concentração de tensão, os deslocamentos resultantes e as deformações equivalentes como mostrado na tabela 6, obtendo os resultados de máximo e mínimo e suas posições na malha.

Tabela 6 – Resultados da análise e suas posições na malha (Chapa 1 original)

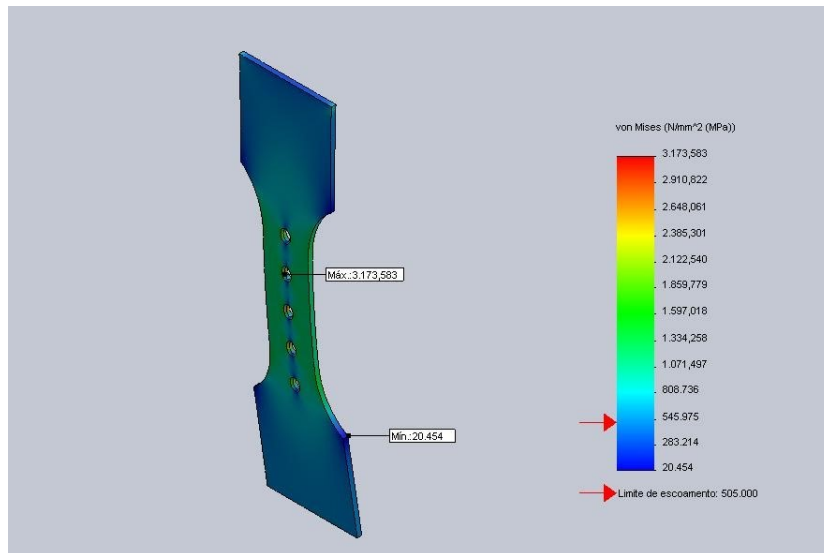
Tipo	Valores	Situação
VON: tensão de Von Mises	20.4537 N/mm ² (MPa) 3173.58 N/mm ² (Mpa)	Nó: 72 Nó: 402
URES: Deslocamento resultante	0,0 mm 3.41 mm	Nó: 125 Nó: 325

Tipo	Valores	Situação
ESTRN : Deformação equivalente	0.000594769 0.0326508	Elemento: 968 Elemento: 4622

Fonte: Autoria Própria.

Na figura 63, os pontos de máximo e mínimo da tensão de Von Mises são mostrados na chapa para melhor compreensão:

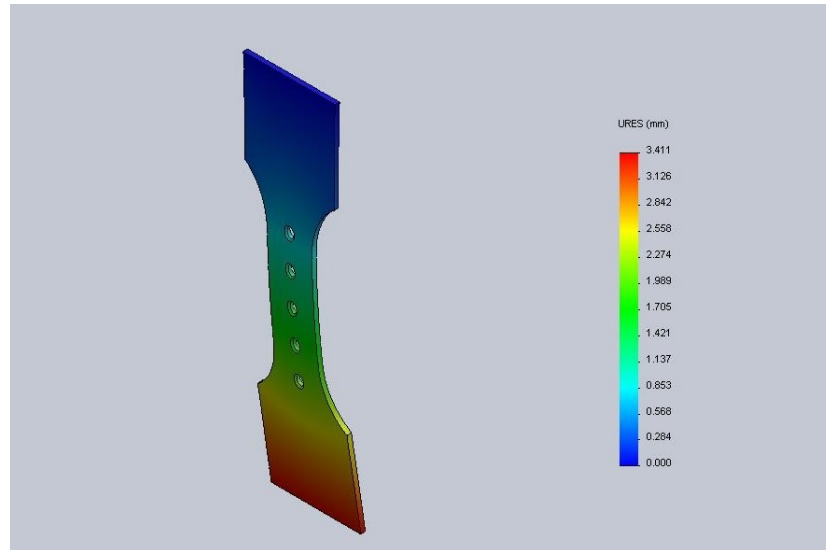
Figura 63 – Tensão de Von Mises, análise estática nodal tensão 1, escala de distorção: 8.89838



Fonte: Autoria própria.

Na figura 64, os pontos de máximo e mínimo do Deslocamento resultante - URES são mostrados na chapa para melhor compreensão:

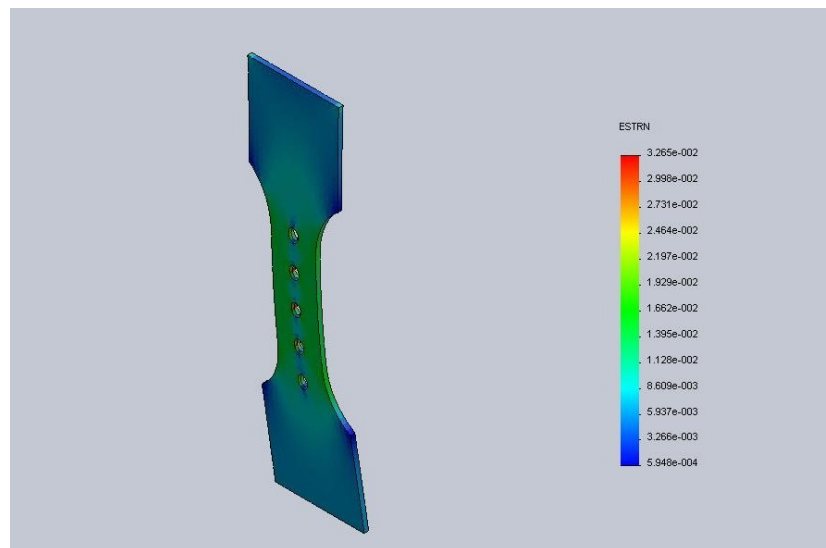
Figura 64 – Deslocamento resultante URES, análise estática, deslocamento estático, deslocamento 1, escala de distorção: 8.89838



Fonte: Autoria própria.

Na figura 65, os pontos de máximo e mínimo da Deformação Equivalente – ESTRN são mostrados na chapa para melhor compreensão:

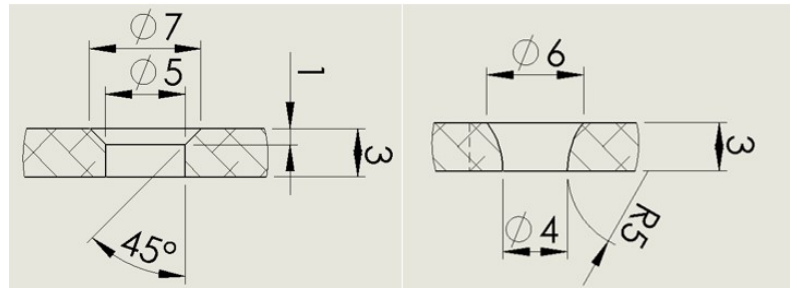
Figura 65 – Deformação equivalente ESTRN, deformação estática, deslocamento 1, escala de distorção: 8.89838



Fonte: autoria própria.

Após feita a análise desses resultados a primeira proposição feita para a diminuição da tensão máxima foi a de uma nova geometria da secção dos furos para alojamento do rebite que distribua a carga nesses pontos em vermelho mais uniformemente, assim após diversos tipos foi definida a seguinte geometria como apresentado na figura 66.

Figura 66 – Medidas do alojamento



Fonte: Padrões de processamento de chapa estrutural (2014).

Na figura 66 a direita têm-se as medidas na chapa e a sua esquerda as medidas propostas para melhor distribuição de tensões nas chapas.

Assim os resultados obtidos dos valores para essa nova proposição de geometria e apresentado na tabela 7:

Tabela 7 – Resultados da análise e suas posições na malha (Chapa 1 proposta)

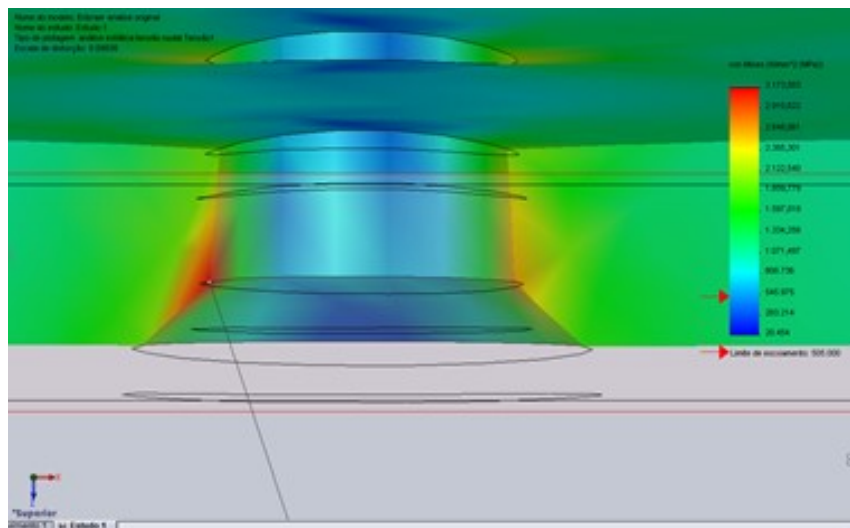
Tipo	Valores	Posição
VON: tensão de Von Mises	20.4380 N/mm ² (MPa) 2594.81 N/mm ² (MPa)	Nó: 174 Nó: 16435

Tipo	Valores	Posição
URES: Deslocamento resultante	0,0 mm 3.52 mm	Nó: 94 Nó: 193
ESTRN: Deformação equivalente	0.000609347 0.0238112	Elemento: 5877 Elemento: 4629

Fonte: autoria própria.

Após a alteração da geométrica da secção do alojamento do rebite houve uma redução de aproximadamente 18,27% nas tensões máximas na chapa além de uma melhor uniformidade na distribuição da tensão nos alojamentos como mostrado na figura 67 e 68.

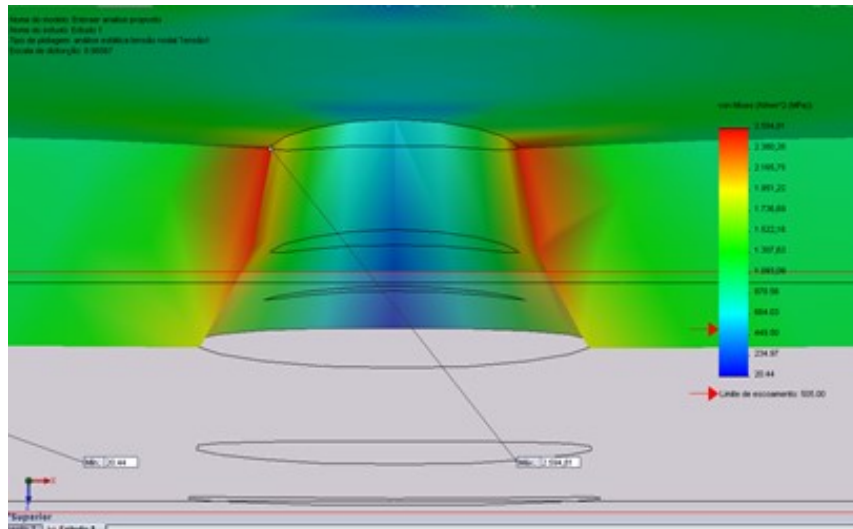
Figura 67 – Secção do alojamento original



Fonte: Autoria própria.

Comparativamente, enquanto o deslocamento teve um aumento de apenas 3,125%, a deformação equivalente mínima obteve 2,39% e a máxima de 24%.

Figura 68 – Secção do alojamento proposto



Fonte: Autoria própria.

5.2 Análise das Imagens Microscópicas das Amostras

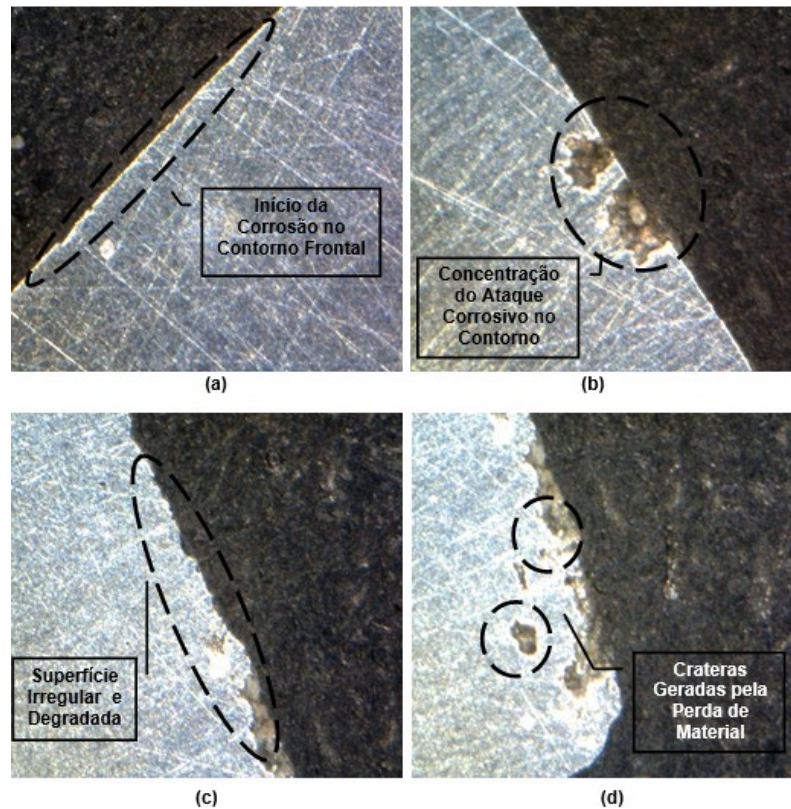
Nesta etapa são apresentadas as micrografias e também avaliado os danos na microestrutura, descrevendo suas possíveis causas, conforme descrito na secção 4.1 .

5.2.1 Análise da Influência de Fluidos de Corte na Propagação de Corrosão Intergranular

A figura 69 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 69 observam-se danos gerados pela corrosão intergranular, nas regiões demarcadas fica evidente o desenvolvimento da corrosão, levando a degradações nas seguintes amostras, amostras polidas, mas sem ataque químico, microscopia ótica convencional.

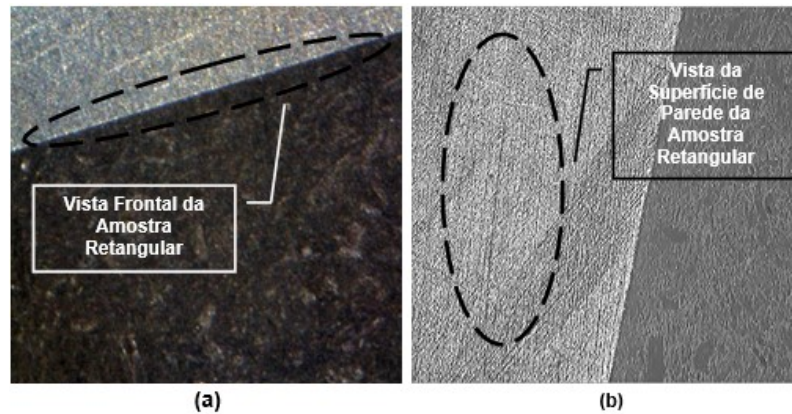
Figura 69 – Contorno frontal das amostras imersas em fluido (380X)



Fonte: Autoria própria.

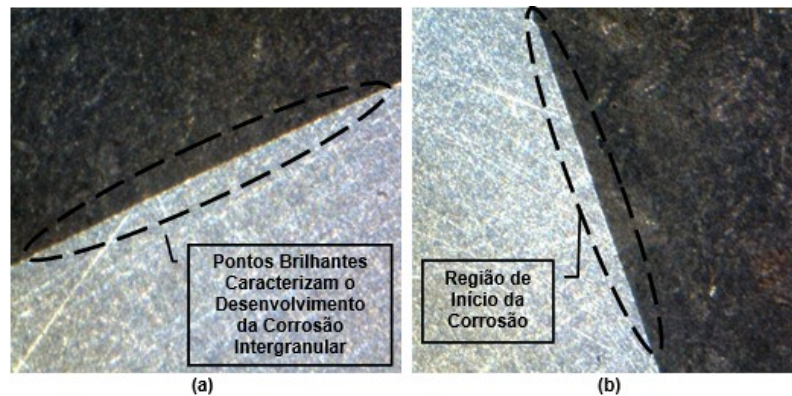
É Possível identificar uma diferença significativa comparando as amostras das figuras 70 e 71, identifica-se uma degradação no entorno do material. Isso se dá pelo fator de perda de material nas regiões circundadas, percebe-se uma coloração mais brilhante e uma superfície irregular, além de muitos pontos 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.

Figura 70 – Amostra sem exposição corrosiva (300 X)



Fonte: Autoria própria.

Figura 71 – Contorno frontal amostra submetida a variações térmicas (300X)



Fonte: Autoria própria.

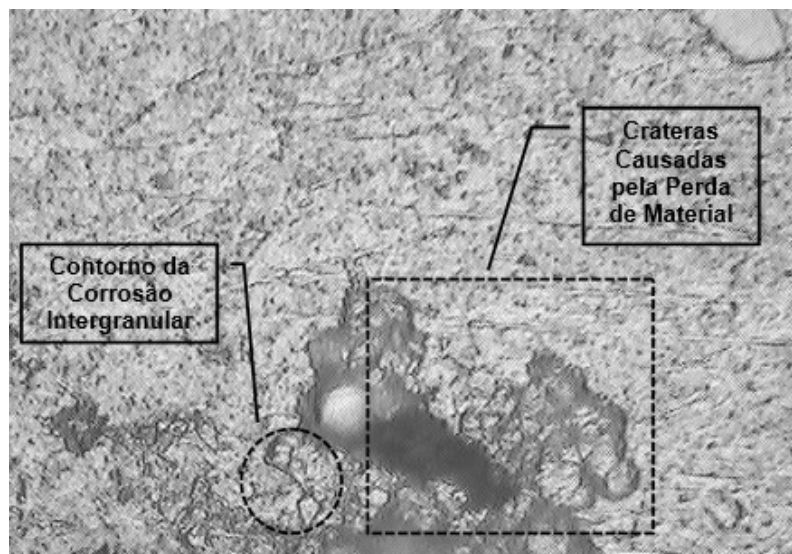
A visualização é esclarecedora e elucida o que já foi falado anteriormente, o procedimento de deterioração que ocorre em diferentes escalas na figura 69 alicerça a dizer que este tipo de corrosão ocorre com boa distribuição sobre a superfície do material. Através das amostras analisadas o que é mais 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.

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 72 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 72 – Contorno dos grãos atacados pela corrosão (400X)



Fonte: Autoria própria.

Com este aumento de 400 vezes foi possível visualizar 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.

5.2.2 Análise de Dureza

Na tabela 8 é mostrada a diferença de dureza superficial entre as amostras que foram expostas à imersão no fluido de corte e às 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 8 – Resultado do ensaio de dureza(HRB)

	Grupo n° 1			Grupo n° 2		Grupo n°3
	1° Amostra	2° Amostra	3° Amostra	1° Amostra	2° Amostra	Amostra única
1° Medição	76	73,7	75,3	75,5	76,25	77
2° Medição	76,7	77	80	75,75	78	76,5
3° Medição	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 9 – Média de dureza de cada grupo de amostras

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

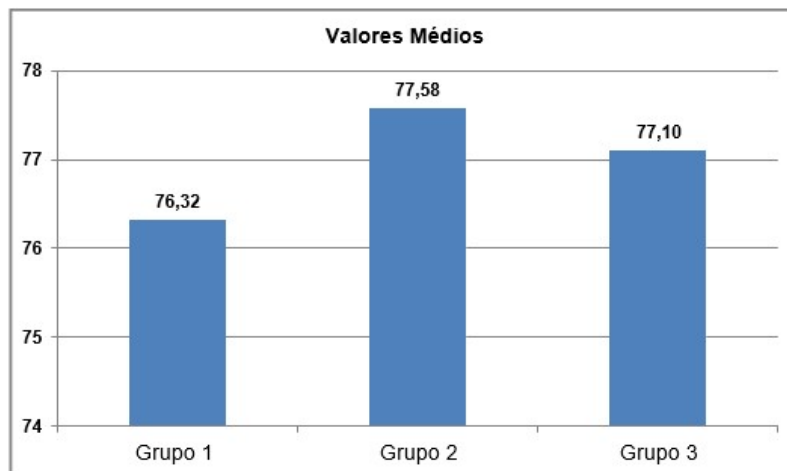
Fonte: Autoria própria.

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 73 demonstra essa diferença de resistência, evidenciando as consequências da corrosão na estrutura e sua diminuição de resistência mecânica superficial.

Figura 73 – 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. A 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.

5.2.3 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 acelerasse a corrosão intergranular. Dessa forma é possível quantificar a influência do fluido nesta liga de alumínio. Os resultados são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Dados resultantes dos ensaios de tração

	Limite De Resistência (KN)	Limite De Escoamento (KN)	Alongamento (%)	Estricção (%)

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

Fonte: autoria própria.

Os ensaios 1 e 2 da tabela 10 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 autoajuste, este primeiro ensaio serviu apenas para auto calibração da máquina, por este motivo foi desconsiderado para o cálculo das médias na tabela 11.

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

Tabela 11 – Média dos valores adquiridos com o ensaio de tração

	Limite De Resistência (KN)	Limite De escoamento (KN)	Alongamento (%)	Estricção (%)
Amostra sem fluido de corte	64,75	56,80	8,80	13,20
Amostras com fluido de corte	63,66	54,51	8,60	12,10

Fonte: autoria própria

Na tabela 10 é separado apenas o ensaio 2 para ser comparado com a média dos ensaios em que os corpos de prova foram expostos ao fluido, os ensaios 3 e 4. Quando comparou-se os tipos de amostras apresentadas na tabela 11 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 à 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.

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.

5.3 Discussão do Estudo Microestrutural e da Resistência a Corrosão

Com base nas análises realizadas, metodologia descrita na seção 4.2, os resultados se mostraram válidos a fim de comparar a influência do fluido de corte na corrosão intergranular da liga 7050-T7451. As condições simuladas condizem com o que é encontrado durante o processo de usinagem, pois, localizadamente, o contato entre a liga e o fluido de corte ocorre em um espaço de tempo muito curto, porém, a tensão exercida pela

ferramenta de corte é muito alta, elevando muito a temperatura, pontualmente, o que facilita a corrosão naquela região. Com a finalidade de averiguar a gravidade do fenômeno da corrosão e assegurar o uso do fluido de corte sem maiores riscos à integridade do material, foi projetado um sistema que submeteu, por um longo período de tempo, as amostras de alumínio à água e ao fluido de corte, levando em consideração uma temperatura média razoável que não compromettesse o tratamento térmico feito no material.

Foi possível observar diferenças em como a corrosão aconteceu, conforme o tempo de exposição e meio de imersão. Nas amostras imersas em água e fluido de corte, no período de sete dias, foi possível notar que a amostra que sofreu ação do fluido de corte apresentou densidade de contornos de grãos evidentemente mais elevada. Isso indica que o fluido de corte agiu como agente corrosivo na região de contorno de grão e tornou-a mais susceptível ao ataque químico. Nas amostras imersas em água a microestrutura foi muito pouco revelada, ratificando que sua integridade física, após o período de imersão, foi pouco afetada.

Para penetrar na amostras, a corrosão precisa vencer a matriz metálica ou contornar o grão, logo, quanto maior o grão na região de borda, menor será a penetrabilidade da corrosão naquela região. Quando havia maior quantidade de grãos na região de borda houve grande concentração de corrosão intergranular, expondo a microestrutura. Isso ocorreu devido ao sentido da laminação que o bloco do qual as amostras foram retiradas foi submetido.

A corrosão intergranular foi facilitada pelo longo período de imersão, além da temperatura elevada. Com esses parâmetros, a difusão dos elementos de liga para o contorno de grão ocorre mais facilmente, formando uma segunda fase que possui potencial eletroquímico diferentes da matriz de Al, sendo assim, uma pilha galvânica localizada é gerada, deixando a região de contorno de grão mais susceptível à corrosão. Esse fenômeno não ocorre no interior do grão pelo fato da difusão nesse meio necessitar de maior energia, não fornecida pelo sistema em questão, logo, a corrosão transgranular é muito menos observada (GENTIL, 1996).

Para as amostras imersas nos meios corrosivos por 14 dias houve uma inversão de resultados. A água se mostrou mais efetiva para corroer as regiões intergranulares do que o fluido de corte. De acordo com a literatura, baixa concentração de NaCl é suficiente para causar pites em amostras de alumínio (DE, SAGAR, *et al.*, 2010). O fluido de corte possui aditivos minerais, mas sua base é vegetal, ou seja, um óleo. O óleo presente no fluido atuou como um mecanismo que, após um determinado período, protegeu a amostra da corrosão causada pela água.

A corrosão intergranular ocorreu em todas as bordas imersas, tanto em fluido de quanto em água, e suas variações foram causadas também pelas variações microestruturais. Quando os grãos são menores, a densidade de contornos de grãos também é menor, sendo assim, pode-se considerar que a área susceptível à corrosão naquela região é maior.

Apesar do acidente ocorrido e da perda da referência, o resultado foi válido para analisar o fenômeno do empobrecimento por cobre. Este é o fator que mais influencia a corrosão intergranular em ligas de alumínio, pois a migração do cobre para o contorno de grão facilita a formação de uma segunda fase que gera diferença de potencial e contribui para a corrosão nessa região (GENTIL, 1996).

A alta concentração de Zn na liga fez com que houvesse uma susceptibilidade ainda maior da microestrutura à corrosão, pois, esse elemento atua como ânodo nos contornos de grão, formando uma pilha galvânica localizada, como indica a literatura (ALONSO-FALLEIROS, 2013).

5.4 Analisando o Ensaio de Fadiga

Com base na seção 4.3 não se pode trabalhar com segurança uma discussão onde analisamos o diferencial de resistência a fadiga para as amostras com e sem amina imersa no fluido de corte, como as amostras em sua grande maioria não puderam ser aproveitadas, a discussão com base nos ensaios fica “pobre”, dito isso, analisando as amostras que passaram pelo ensaio, fica perceptível a diferença de ciclos da amostra imersa em fluido sem amina. A condição 2, onde o corpo de prova foi exposto à amina, o número de ciclos de vida é bem menor quando comparamos o número de ciclos da vida da única amostra remanescente na condição 1, corpo de prova imerso em fluido sem amina.

6 CONCLUSÃO

Constata-se que é relevante que um ensaio de fadiga seja refeito em trabalhos futuros, com maior número de amostras, onde seja possível realizar uma verificação estatística quanto a diminuição da resistência á fadiga para amostras que ficaram expostas ao fluido de corte com presença de amina.

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.

É possível também afirmar que o sistema elaborado para expor o material à corrosão se mostrou válido e o resultado da pesquisa pôde ser obtido com certa clareza. Sendo assim, as experimentações permitiram pontuar algumas conclusões parciais, as amostras imersas apresentaram corrosão intergranular com pouca penetração corrosiva na amostra, sendo que o fluido de corte apresentou maior efeito sobre o material.

As condições de ensaio de corrosão tentaram simular as condições de usinagem a fim de testar a corrosividade do fluido de corte, e os resultados indicam haver aumento significativo quando se compara com a não aplicação do mesmo.

Para que a afirmativa fosse completamente constatada, ao se falar do desenvolvimento da corrosão intergranular, seria necessário uma análise mais aprofundada utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), assim, todos os pontos de interesse indicados ao longo desse trabalho poderia ser analisados, inclusive as amostras do ensaio de fadiga rompidas de forma precoce e que não puderam ser validadas, poderiam ser melhor analisadas identificados.

E algo importante 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 independentemente do equipamento deve resultar em confiabilidade, protegendo de qualquer risco que possa ser consolidado por alguma falha não monitorada.

BIBLIOGRAFIA

- ALONSO-FALLEIROS, N. Corrosão Intergranular. **Departamento de Engenharia de Metalurgia de Materiais**, São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/lpe/Corrosao/12_Intergranular.pdf>. Acesso em: 3 Abr 2018.
- 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>. Acesso em: 15 maio 2014.
- CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CHERN, G. L. **Study on Mechanisms of Burr Formation and Edge Breakout Near the Exit of Orthogonal Cutting**. *Journal of Materials Processing Technology*, Taiwan, v. 176, n. 1, p. 152–157, jun. 2006.
- CHOI, J.; MIN, S.; DORNFELD, D. **Finite Element Modeling of Burr Formation in Drilling of a Multi-layered Material**. Consortium on Deburring and Edge Finishing, Berkeley, maio 2004.
- CHOI, J.; MIN, S.; DORNFELD, D.; ALAM, M.; TZONG, T. Modeling of Inter-layer Gap Formation in Drilling of a Multi-layered Material. Proceedings for the 6th CIRP Workshop on Modeling of Machining, 19-20/05/2003 Hamilton, ONT, Canadá.
- COUTINHO, Carlos Bottrel. **Materiais Resistêntes à Corrosão e a Oxidação**. In: COUTINHO, Carlos Bottrel. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 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.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro-RJ: Editora LTC Livros Técnicos e Científicos S/A, 1996.

GILLESPIE, L. Deburring and Edge Finishing Handbook. 1. ed. Kansas City: **American Society of Mechanical Engineers**, 2000. 416 p.

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.

KO, S. L.; DORNFELD, D. A. **A Study on Burr Formation Mechanism**. *Journal of Engineering, Materials and Technology*, Berkeley, v. 113, n. 1, p. 75-87, jan. 1991.

L.F. Mondolfo, **Aluminum Alloys: Structure and Properties**. London: Butterworths, 1976, p 283-285.

MARTINS, J. I.; MARTINS, F. P. **A corrosão: a outra perspectiva de abordagem**. *Corros. Prot. Mater.*, v. 31, n. 3/4, p. 60-64, 2012.

MENEGHESSO, Adeal 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.

Metallographic Technique for Aluminum Alloys, *Metals Handbook, Metallography, Structures and Phase Diagrams*, 8th ed., Vo18, American Society for Metals, 1972, p 120-129

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.

- SICHERI, V. J. **AVALIAÇÃO DA CORROSÃO INTERGRANULAR DA LIGA DE ALUMÍNIO 7050-T7451 INFLUENCIADA PELO FLUIDO DE CORTE À BASE DE ÓLEO DE PINHÃO-MANSO** - JATROPHA CURCAS. 2015. 84 p. Monografia (Engenharia de Materiais) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Acesso em: 10/10/2022.
- SILVA, J. D.; SARAMAGO, S. F. P.; MACHADO, A. R. **Optimization of the Cutting Conditions** (vc, fz e doc) for Burr Minimization in Face Milling of Mould Steel. Journal of the Brazillian Society of Mechanical Science and Engineering. Uberlândia, v. 31, n. 2, p. 151-160, jun. 2009.
- TEIXEIRA, Patrícia Helena de Oliveira; TRABASSO, Luis Gonzaga; BORILLE, Anderson Vicente. Influência de Diferentes Sistemas de Lubrificação na Furação de Chapas de Alumínio Aeronáutico. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, Erechim, v. 1, n. 1, p. 1-2, 21 nov. 2011.
- TOTTEN, G. E.; MACKENZIE, D. S. **Handbook of Aluminum: Volume 2 Alloy Production and Materials Manufacturing**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 2003. 736 p.
- YOON, Joe. **Static Discharge Wicks**. 2005. Disponível em: <<http://www.aerospaceweb.org/question/design/q0234.shtml>>. Acesso em: 6 fev. 2014.
- W.A. Backofen, I.R. Turner, and D.H. Avery, **Transactions American Society for Metals**, Vol 57, 1964, P 980 / S.D. Fields, Jr., IBM J Res Develop, Vol 9, 1964, P 134
- W.J. Liang, Q.L. Pan, Y.B He, Y.C. Li, Y.C. Zhou, **Effect of aging on the mechanical properties and corrosion susceptibility of an Al-Cu-Li-Zr alloy containing Sc**, Rare Metals, 27 (2008) 146-152.