

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ANÁLISE DO EFEITO DA PRECIPITAÇÃO DA FASE
BETA Mg_2Al_3 NA CORROSÃO INTERGRANULAR DA
LIGA AA5083, AQUECIDA À TEMPERATURA DE 170°C E
240°C EM BANHO NÍTRICO NA CONCENTRAÇÃO DE
60% DE ÁCIDO**

**João Marcus de Resende Lourenço
Sandra Aline da Silva Araujo**

**Pindamonhangaba - SP
2018**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ANÁLISE DO EFEITO DA PRECIPITAÇÃO DA FASE
BETA Mg_2Al_3 NA CORROSÃO INTERGRANULAR DA
LIGA AA5083, AQUECIDA À TEMPERATURA DE 170°C E
240°C EM BANHO NÍTRICO NA CONCENTRAÇÃO DE
60% DE ÁCIDO**

**João Marcus de Resende Lourenço
Sandra Aline da Silva Araujo**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Processos Metalúrgicos

Área de Concentração: Materiais

Orientador (a): Msc. Alexandre Sartori

**Pindamonhangaba - SP
2018**

L934a Lourenço, João Marcus de Resende.
Análise do efeito da precipitação da fase beta Mg_2Al_3 na
corrosão intergranular da liga AA5083, aquecida à temperatura de
170°C e 240°C em banho nítrico na concentração de 60% de ácido /
João Marcus de Resende Lourenço; Sandra Aline da Silva Araujo /
FATEC Pindamonhangaba, 2018.
66f.; il.

Orientador: Professor Msc. Alexandre Sartori
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de
Pindamonhangaba. 2018

1. Sensitização. 2. Corrosão intergranular. 3. Liga AA 5083.
I. Lourenço, João Marcus de Resende. II. Araújo, Sandra Aline da
Silva. III. Sartori, Alexandre. IV. Título.

CDD 620

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

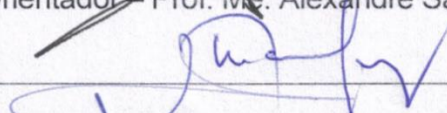
ANÁLISE DO EFEITO DA PRECIPITAÇÃO DA
FASE BETA Mg_2Al_3 NA CORROSÃO
INTERGRANULAR DA LIGA AA5083, AQUECIDA
A TEMPERATURA DE $170^\circ C$ E $240^\circ C$ EM BANHO
NÍTRICO NA CONCENTRAÇÃO DE 60% DE
ÁCIDO.

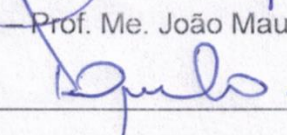
SANDRA ALINE DA SILVA ARAUJO
JOÃO MARCUS DE RESENDE LOURENÇO

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
TECNOLOGIA EM PROCESSOS
METALÚRGICOS.

Comissão Examinadora


Orientador - Prof. Me. Alexandre Sartori


Membro - Prof. Me. João Maurício Godoy


Membro - Prof. Esp. Rômulo Lucas Borges

Pindamonhangaba, 12 de dezembro de 2018.

DEDICATÓRIA

João Marcus de Resende Lourenço

Dedico este trabalho a todos os aficionados em metalurgia e a quem procura entender melhor o alumínio, a todos os professores que de alguma forma contribuíram com o desenvolvimento dos alunos e com isso proporcionaram um melhor conhecimento da metalurgia.

Além de dedicar ao curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos, e a todas as pessoas que conviveram conosco nesta faculdade durante esses três anos.

Sandra Aline da Silva Araujo

Este trabalho é dedicado a todos os interessados em conhecer e entender melhor o alumínio e a todos os professores que de alguma forma contribuíram com o desenvolvimento dos alunos e com a metalurgia do alumínio.

Além de dedicar ao curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos, e a todas as pessoas que conviveram conosco nesta faculdade durante esses três anos. Por fim, a experiência dada de realizar uma produção de maneira compartilhada com todos os amigos nessas salas, onde foi a melhor experiência desta formação acadêmica.

AGRADECIMENTO

João Marcus de Resende Lourenço

Agradeço primeiramente a Deus por ter dado força, e me guiado até este momento. Agradecer a minha família pelos incentivos e auxílio durante o tempo de dedicação ao curso. A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior.

Um agradecimento especial ao Prof. Msc. Alexandre Sartori, pelas orientações, aulas, pelo tempo em que esteve disponível para atender a cada questionamento e pelo seu alto desprendimento em ajudar a cada aluno. E aos amigos da classe pelo incentivo e pela grande ajuda com os trabalhos feitos durante estes anos.

Um último agradecimento a todos que deixaram sua contribuição e ajuda para a realização deste trabalho.

Sandra Aline da Silva Araujo

Aqui ficam registrados os agradecimentos a Deus por ter dado força, sabedoria, motivação e paciência em cada dia difícil, pois, depois de um dia de trabalho é ainda mais difícil conseguir terminar um curso do nível que é o de Tecnologia em Processos Metalúrgicos. É importante destacar os agradecimentos a família pelos incentivos e pela compreensão durante a ausência causada pela necessidade de dedicação ao curso.

Um agradecimento especial ao Prof. Msc. Alexandre Sartori, pelas orientações, aulas, pelo tempo em que esteve disponível para atender a cada questionamento e pelo seu alto desprendimento em ajudar a cada aluno. E aos amigos da classe pelo incentivo e pela grande ajuda com os trabalhos feitos durante estes anos.

Para finalizar, o último agradecimento a todos que contribuíram e ajudaram de alguma forma a realização deste trabalho e a todos os amigos conquistados durante o curso.

Que todos os nossos esforços estejam sempre focados no desafio à impossibilidade. Todas as grandes conquistas humanas vieram daquilo que parecia impossível.

Charles Chaplin

ARAUJO, S. A. S.; LOURENÇO, J. M. R. **Análise do efeito da precipitação da fase beta Mg_2Al_3 na corrosão intergranular da liga AA5083, aquecida à temperatura de 170e 240°C em banho nítrico na concentração de 60% de ácido.** 2018. 67p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2018.

RESUMO

Este trabalho procurou evidenciar os efeitos do tratamento de sensibilização na liga de alumínio do grupo 5XXX, este grupo é fundamental na fabricação de produtos que necessitam de alta resistência mecânica e à corrosão, e com isso se fez necessário o estudo dos efeitos causados a liga após o tratamento. A liga AA5083 é utilizada na indústria naval e também para fabricação de tanques para transporte de produtos químicos, dentre eles o ácido nítrico, sendo assim agredida por meios ácidos e corrosivos. Por toda via, o presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento da liga de alumínio AA5083 sensibilizada (submetida a um tratamento térmico na temperatura de 170°C e 240°C por um período de 168 horas) e não sensibilizada (estado de fabricação) em concentração de ácido nítrico 60% diluídos em álcool. As amostras analisadas evidenciaram maior perda de massa e corrosão intergranular nos materiais sensibilizados.

Palavras-chave: Sensibilização. Corrosão Intergranular. Liga AA5083.

ARAUJO, S. A. S.; LOURENÇO, J. M. R. **Analysis of the effect of the Mg₂Al₃ beta phase precipitation on the intergranular corrosion of the AA5083 alloy, heated at 170°C and 240°C in a 60% concentration of nitric acid.** 2018. 67p. Graduation Project (Metallurgical Processes Course). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2018.

ABSTRACT

This work aimed to show the effects of the treatment of sensitization in the aluminum alloy of the 5XXX group, this group is fundamental in the manufacture of products that need high mechanical strength and corrosion, and with that it was necessary to study the effects caused to the alloy after the treatment. The AA5083 alloy is used in the naval industry and also for the manufacture of tanks for transporting chemical products, among them nitric acid, and is thus attacked by acidic and corrosive means. The objective of this work was to study the behavior of the sensitized aluminum alloy AA5083 (subjected to a thermal treatment at 170 ° C and 240 ° C for a period of 168 hours) and non-sensitized(State of manufacture) in nitric acid concentration 60% diluted in alcohol. The analyzed samples showed greater loss of mass and intergranular corrosion in the sensitized materials.

Keywords: Sensitization. Intergranular Corrosion. League AA5083.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplificação do processo de mineração da bauxita.....	18
Figura 2 – Processo de extração	18
Figura 3 – Processo de transformação da alumina calcinada em alumínio metálico	19
Figura 4 – Processo de transformação da alumina calcinada em alumínio metálico	19
Figura 5 – Laminadores.....	20
Figura 6 – Laminação a frio	22
Figura 7 – Laminação de folhas.....	22
Figura 8 – Laminação de folhas.....	23
Figura 9 - Processo de reciclagem das latas de alumínio	27
Figura 10 – Estrutura cristalina CFC	28
Figura 11 – Designação das ligas trabalháveis.....	31
Figura 12 - Têmperas em Alumínio F, O, H ou T	39
Figura 13 - Diagrama de fase Al-Mg	40
Figura 14 - Especificação de Composição Química AA5083, em % por peso.....	43
Figura 15 - Formas esquemáticas de corrosão	45
Figura 16 – Corrosão uniforme	46
Figura 17 – Corrosão por pite	46
Figura 18 – Corrosão por frestas	47
Figura 19 – Corrosão galvânica	48
Figura 20 - Pilha de ação local.....	52
Figura 21 – Peso inicial das amostras.....	53
Figura 22–Forno mufla.....	54
Figura 23 – Decapagem em hidróxido de sódio a 70°C	55
Figura 24 – Decapagem em ácido clorídrico.....	55
Figura 25 – Início da corrosão	56
Figura 26 – Início da corrosão	56
Figura 27 – Gráfico de perda de massa.....	58
Figura 28 – Amostra inicial como polida.....	59
Figura 29 – Amostra em estado inicial possui precipitados da fase β no interior do grão e em rede contínua no contorno de grão.	60
Figura 30 – Amostra sensibilizada a 170°C após ataque. Precipitados da fase β em rede contínua no contorno de grão com a corrosão intergranular.	60
Figura 31 – Amostra tratada a 240°C após ataque.	61
Figura 32 – Amostra como inicial após ataque. Precipitados da fase β no interior do grão e princípio de corrosão intergranular e corrosão uniforme.	62
Figura 33 – Amostra sensibilizada a 170°C após ataque. Corrosão intergranular e início de esfoliação.	62
Figura 34 – Amostra sensibilizada a 240°C após ataque. Corrosão localizada (pites).....	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 HISTÓRIA DO ALUMÍNIO	16
2.2 OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	17
2.3 REFUSÃO	20
2.4 LAMINAÇÃO	20
2.4.1 Laminação a Frio.....	21
2.4.2 Laminação a Quente	22
2.4.3 Laminação Contínua.....	23
2.5 CASTER	24
2.6 RECICLAGEM.....	25
2.7 CARACTERÍSTICAS DAS CAMADAS DE ÓXIDOS.....	27
2.8 ELEMENTOS DE LIGA.....	29
2.8.1 Ligas Trabalháveis Não-Tratáveis Termicamente.....	31
2.8.2 Ligas Trabalháveis Tratáveis Termicamente.....	32
2.8.3 Série de Ligas de Alumínio	32
2.8.3.1 Ligas 1XXX	33
2.8.3.2 Ligas Alumínio – Cobre 2XXX.....	33
2.8.3.3 Ligas Alumínio – Manganês 3XXX	33
2.8.3.4 Ligas Alumínio – Silício 4XXX	34
2.8.3.5 Ligas Alumínio – Magnésio 5XXX	34
2.8.3.6 Ligas Alumínio – Magnésio – Silício 6XXX.....	35
2.8.3.7 Ligas Alumínio – Zinco 7XXX.....	35
2.8.3.8 Ligas Alumínio Série 8XXX	35
2.8.4 Influência Dos Elementos de Liga.....	36
2.8.4.1 Cromo	36
2.8.4.2 Alumínio – Cobre	36
2.8.4.3 Ferro	36
2.8.4.4 Magnésio	37
2.8.4.5 Manganês.....	37
2.9 CLASSIFICAÇÃO DE TÊMPERAS EM ALUMÍNIO.....	37
2.10 CARACTERÍSTICAS DA LIGA AA5083	40
2.11 SENSITIZAÇÃO.....	41
2.12 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA AA5083.....	42
2.12.1 Resistências à Corrosão	43
2.12.2 Tratamento Térmico.....	43
2.12.3 Soldagem.....	44

2.13	CORROSÃO	44
2.13.1	Corrosão Uniforme	45
2.13.2	Corrosão por Pite	46
2.13.3	Corrosão por Frestas	46
2.13.4	Corrosão Galvânica	47
2.13.5	Corrosão sob Tensão	48
2.13.6	Corrosão Microbiológica	48
2.13.7	Esfoliação	49
2.13.8	Filiforme	49
2.13.9	Corrosão Intergranular	49
2.13.9.1	Corrosão Intergranular do Alumínio	51
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	MATERIAIS	53
3.2	MÉTODOS	53
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

O alumínio não é um dos elementos mais antigos, segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) a descoberta do alumínio conforme é conhecido atualmente foi em 1827, quase 200 anos apenas sendo considerado recente se comparado a outros metais, como o ferro ou o cobre, que foram descobertos há mais tempo.

Mesmo sendo recente seu consumo vem aumentando consideravelmente a cada ano, a ABAL (2017) informou que no primeiro trimestre de 2017 o aumento foi de 1,8% se comparado ao mesmo período do ano anterior, isso se refere a 306,7 toneladas de material. O consumo do alumínio pode aumentar ainda mais com a fabricação de automóveis segundo a Autonews (2018), a Aluminum Association editou uma carta respondendo questões sobre este novo mercado do alumínio e afirmou que os fabricantes estão utilizando cada vez mais este metal, também a empresa Ducker Worldwide (2018) especialista em análise de mercado afirmou em sua pesquisa com fabricantes de automóveis que alumínio continua sendo o material automotivo com maior crescimento entre os principais materiais.

Mas para alcançar novos mercados e melhorar o comportamento na condição atual é necessário que o material suporte situações e ambientes desfavoráveis e variados, por este motivo é realizado testes de corrosão para avaliar como o material reage e suporta a esta situação, sabendo das limitações do mesmo é necessário avaliar para expor ao mercado algo concreto e confiável, por este motivo o estudo de corrosão é imprescindível. O fornecedor de alumínio não pode oferecer a um fabricante de automóveis, por exemplo, um material que possui uma estrutura favorável a corrosão intergranular, pois ao menor ataque do ambiente diário a esta estrutura a fragilidade aumentará e dependendo da peça pode causar danos graves ao motorista e conseqüentemente também ao fabricante do veículo.

A análise de corrosão dos materiais se faz necessária para prever possíveis problemas que o material possa ter em seu ambiente de aplicação, como um navio que deverá suportar um ambiente com água salgada e umidade excessiva ou um recipiente para armazenar soluções químicas que terá que suportar soluções ácidas. A corrosão é inevitável, mas saber prevenir irá fazer a diferença no mercado e com isso estudar este fenômeno se torna algo indispensável em qualquer situação. Como a corrosão pode ocorrer por variadas razões em diferentes ambientes é importante sempre ter uma documentação sobre o maior número de ocorrências possível, afim de, facilitar a determinação do material usado para o produto final, sabendo se este terá que sofrer um tratamento térmico para a prevenção da corrosão ou se o tratamento térmico irá favorecer este fenômeno. Por fim, a determinação do produto final deverá sempre ser determinada com a consciência da sua alta ou baixa fragilidade a corrosão.

Sabe-se que o alumínio é um material considerado resistente a corrosão quando exposto a variados ambientes inclusive a variados ácidos, isso devido à camada de óxido que

se forma em sua superfície o protegendo, porém, em ambientes salinos como o marítimo o alumínio tem essa camada desfeita e assim, fica exposto sendo corroído pelo ambiente por isso para este fim são utilizadas as ligas da série 5XXX (cinco mil) que são ligas de Al-Mg (Alumínio - Magnésio). Estas ligas Al-Mg possuem alta resistência tanto mecânica quanto à corrosão, os elementos de liga oferecem ao elemento principal propriedades diferentes e/ou reforçam propriedades que estes já possuem com isso o magnésio oferece maior resistência à corrosão ao alumínio em ambientes marítimos. Devido à variedade de aplicações é importante que esta liga não esteja com uma estrutura sensibilizada para evitar a corrosão intergranular.

A corrosão intergranular ocorre porque a estrutura do material possui um caminho localizado no contorno do grão que causa preferencialmente a corrosão, sendo evidenciados os grãos a medida que a corrosão se propaga pelos seus contornos. Este fenômeno acontece principalmente pela diferença que existe entre a resistência a corrosão da matriz (interior do grão) e do material que fica ao lado do contorno de grão, isso ocorre porque a composição química nestes locais é diferente ou porque existe diferença de potencial.

No caso da liga AA5083 de Al-Mg quando o material está sensibilizado (fenômeno que ocorre no range de temperatura de 60 a 200°C onde a fase beta Mg_2Al_3 precipita em rede contínua em contorno de grão, dentro o grupo 5XXX Al-Mg somente ligas com mais de 3% de magnésio estão sujeitas a sensibilização, assim como, ligas de Al-Mg-Si, Al-Cu e Al-Zn. Com a fase beta Mg_2Al_3 precipitada esta fase é corroída porque possui menor resistência a corrosão se comparada à matriz.

Ao deixar por 24 horas em banho de ácido nítrico de 60% de concentração as amostras que ficaram em fornos com temperaturas de 170 e 240° e a amostra inicial será possível analisar o nível de corrosão intergranular em cada uma das amostras e a interferência da estrutura sensibilizada na degradação da amostra que este fenômeno aconteceu e a diferença que esta possui se comparada as demais amostras.

O problema analisado é como a liga de alumínio AA5083 se comportará após ser deixada por 24 horas em banho de ácido nítrico de 60% de concentração sabendo que uma amostra é inicial, ou seja, suas propriedades são do material que sai direto da laminação. A outra amostra sofreu o tratamento térmico, onde permaneceu no forno por 168 horas a uma temperatura de 170°C e a última também permaneceu no forno por 168 horas, porém a uma temperatura de 240°C.

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da liga de alumínio AA5083 que foi tratada termicamente em duas temperaturas distintas 170 e 240°C e depois foi submetida ao banho de ácido nítrico de 60% de concentração por 24 horas. Tendo como foco identificar a influência da microestrutura na resistência à corrosão da liga AA5083, verificar a perda de massa de cada uma das amostras, determinar a influência da temperatura no resultado final

da corrosão, verificar o processo de sensibilização do material que sofreu tratamento térmico e evidenciar o processo de corrosão intergranular.

Como esta produção acadêmica trará conhecimentos para o mercado metalúrgico é natural que haja interesse de demais pesquisas acadêmicas utilizando outras temperaturas com outras concentrações de ácidos afim de, provar que em diferentes condições o material se comporta de formas distintas com menor ou maior perda de massa. Estas pesquisas são validas no ambiente acadêmico para conhecimento dos pesquisadores e para estabelecer discussões sobre os resultados em cada uma das situações. Sendo assim, esta produção científica é imprescindível ao mercado e a academia de pesquisadores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRIA DO ALUMÍNIO

O nome “alumínio” vem do latim “alumem”, este nome é dado a um dos sais latinos conhecido desde a antiguidade, este elemento é o sulfato de alumínio (utilizado para fixar corantes em tecidos). Na Roma antiga e também na Grécia se empregava a pedra-ume (do latim *alūmen*), um sal duplo de alumínio e potássio, como medicamento (atualmente está em vigor) e como mordente em tinturaria (ABAL, 2018).

Segundo Peixoto (PEIXOTO, 2001) a cerca de 7.000 anos passados, a região que atualmente é chamada de Iraque habitava um povo que já produzia cerâmicas de qualidade possuindo um elevado teor de alumínio, sendo que a cerca de 4.000 anos atrás, os povos egípcios e babilônicos utilizavam determinados compostos de alumínio no preparo de diferentes produtos medicinais e também em produtos químicos.

No ano de 1807, o pesquisador de origem inglesa, Humphry Davy, tentava isolar o alumínio partindo do seu composto conhecido na época e que atualmente é chamado de alumina (óxido de alumínio, Al_2O_3). Davy acreditava fielmente que o composto conhecido possuía uma base metálica, porém, não conseguiu isolar o metal, mas deu a esta base metálica é nome de *aluminium*, mais tarde os ingleses passaram a chamá-lo de *aluminum* e em outros idiomas era *aluminium* (PEIXOTO, 2001).

A primeira vez que o metal alumínio foi preparado em laboratório foi no ano de 1825, quando Christian Orsted estudava corrente elétrica e com isso tentou isolar o alumínio por meio do seu óxido (alumina), com isso preparou o cloreto de alumínio (AlCl_3) que foi trabalhado como uma amálgama de potássio que uma determinada liga de potássio com mercúrio, a partir disso ele conseguiu a amálgama de alumínio que foi aquecido e com isso os seus constituintes foram separados sendo eles o mercúrio e o alumínio, sendo que o mercúrio evaporou restando apenas o alumínio metálico (PEIXOTO, 2001).

O trabalho de Orsted não teve muita repercussão, com isso apenas em 1827 o alumínio consideravelmente puro foi trabalhado por Friedrich Whöler, baseado no trabalho de Orsted, e assim obteve sua descrição mais certa (PEIXOTO, 2001).

Apesar de o alumínio ser um metal encontrado em abundância na crosta terrestre, com cerca de 8,1%, dificilmente é encontrado livre. As aplicações industriais são consideradas relativamente recentes, tendo sua produção em escala industrial a partir do final do século XIX. Juntamente com sua descoberta também foi possível verificar que a separação do metal e das rochas que o continham possuía alta dificuldade. Como consequência, por algum tempo

foi considerado um metal precioso, sendo considerado mais valioso até que o ouro (PEIXOTO, 2001).

No ano de 1859, Henri Deville anunciou determinadas melhorias no processo de obtenção, ao substituir o potássio por sódio e o cloreto simples pelo duplo (SARTORI, 2009). Com o avanço dos processos de obtenção os preços baixaram continuamente até entrar em colapso em 1889, devido a ser encontrado um método mais simples de extração. Atualmente, um dos fatores que mais estimulam o uso desse metal é a estabilidade do seu preço, causada principalmente pela sua reciclagem (ABAL, 2018).

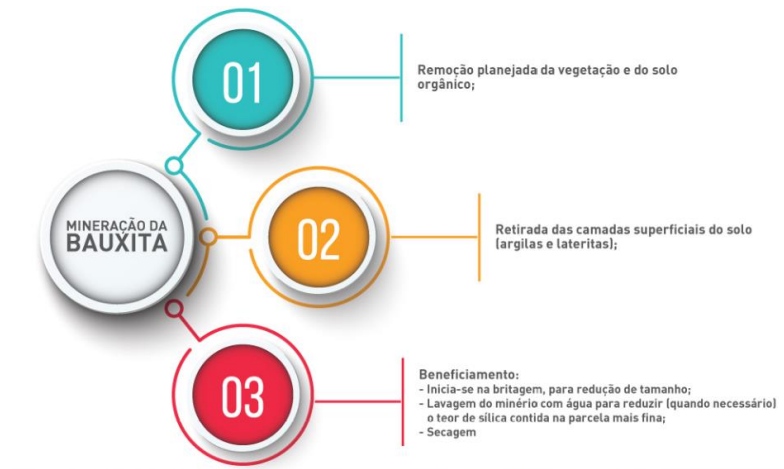
2.2 OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Segundo a ABAL (2008) a bauxita é o minério do alumínio, que como já dito anteriormente está em abundância na crosta terrestre. Para obter o óxido de alumínio o processo Bayer, o mais usual e conhecido, este é um método de extração e partição hidrometalúrgico. A bauxita pode ser encontrada em regiões mediterrâneas, tropicais e subtropicais.

Para que a produção do alumínio seja economicamente viável é necessário que o minério de alumínio possua cerca de 40% a 60% do óxido de alumínio (Al_2O_3) aproveitável. O Brasil possui reservas de bauxita com ótima qualidade do minério e que estão entre as maiores do mundo (ABAL, 2018). No Brasil é possível encontrar reservas como as de Poços de Caldas e também jazidas com demais compostos de alumínio utilizados como pedras preciosas e semipreciosas. Estes compostos podem ser encontrados principalmente em estados como o de Minas Gerais, Bahia e em parte da Amazônica. O Brasil não está nem entre os cinco maiores produtores de alumínio mesmo produzindo uma boa quantidade, sendo que o primeiro lugar ficam os Estados Unidos (PEIXOTO, 2001).

A Figura 1 exemplifica o processo de mineração da bauxita:

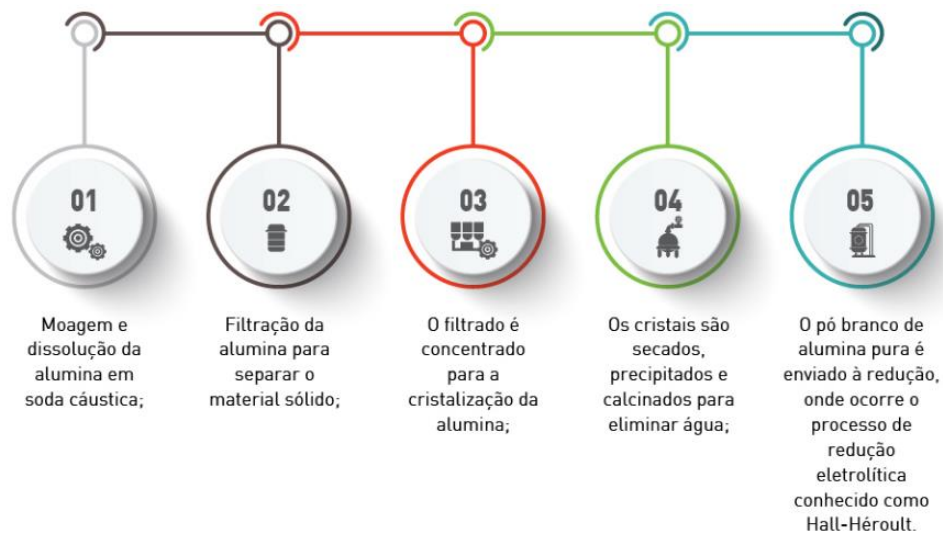
Figura 1 - Exemplificação do processo de mineração da bauxita



Fonte: ABAL, 2018

A premissa do processo é a extração do hidróxido de alumínio da bauxita por meio de uma solução de soda a temperaturas elevadas. Com a separação dos resíduos sólidos após o resfriamento da suspensão, após a retirada do hidróxido de alumínio da solução agora supersaturada através da cristalização e devolução da solução de soda. Agora acontece a separação do hidróxido cristalizado e este é transformado termicamente para óxido conhecido, ou seja, a alumina (Al_2O_3) (ABAL, 2018). A Figura 2 mostra este processo de extração:

Figura 2 – Processo de extração



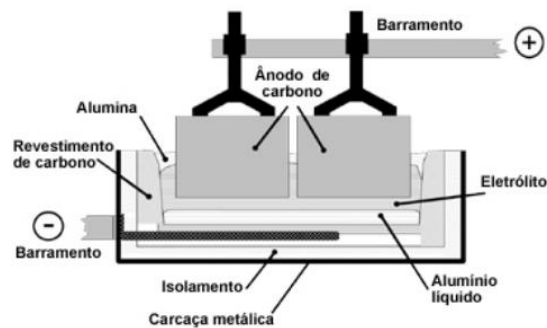
Fonte: ABAL, 2018

O processo Hall-Héroult (item cinco da Figura 2) é responsável pela etapa de redução da alumina para o metal, através da sua eletrólise em temperaturas de $950^{\circ}C$ a $980^{\circ}C$. O óxido é então dissolvido em criolita fundida e por meio do ânodo do sistema se faz a decomposição química do óxido, obtendo-se o alumínio em sua forma líquida em alta temperatura. Em resumo, cerca de 4 Kg de bauxita conseguem produzir tona de 2 Kg de

alumina que em sua vez originam 1 Kg de alumínio (ABAL, 2018). A Figura 3 mostra o processo de transformação da alumina calcinada em alumínio metálico e a Figura 4 explica o processo por meio de etapas.

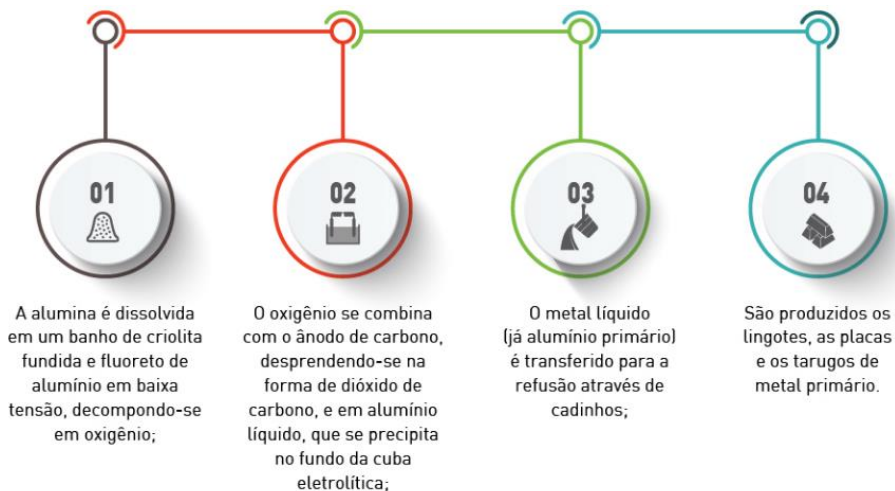
A descoberta do processo Hall-Héroult no ano de 1886 simplificou e barateou a extração do alumínio a partir do mineral. Estes processos, o Bayer somado ao Hall-Héroult (descoberto no mesmo ano), permitiram aumentar o uso do alumínio para uma multiplicidade de aplicações até então considerados economicamente inviáveis (SARTORI, 2009). A prática conhecida desde o início do século XX é a recuperação do metal a partir de sua reciclagem, porém, foi a partir da década de 1960 que o processo se generalizou, consequência maior por razões ambientais do que econômicas (ABAL, 2018).

Figura 3 – Processo de transformação da alumina calcinada em alumínio metálico



Fonte: ABAL, 2018

Figura 4 – Processo de transformação da alumina calcinada em alumínio metálico



Fonte: ABAL, 2018

É possível então entender e fazer uma distinção entre ligas fundidas, que são aquelas obtidas diretamente da vazão do metal líquido e a solidificação, e também as ligas trabalháveis dos quais os produtos acabados são obtidos por meio de transformações mecânicas.

2.3 REFUSÃO

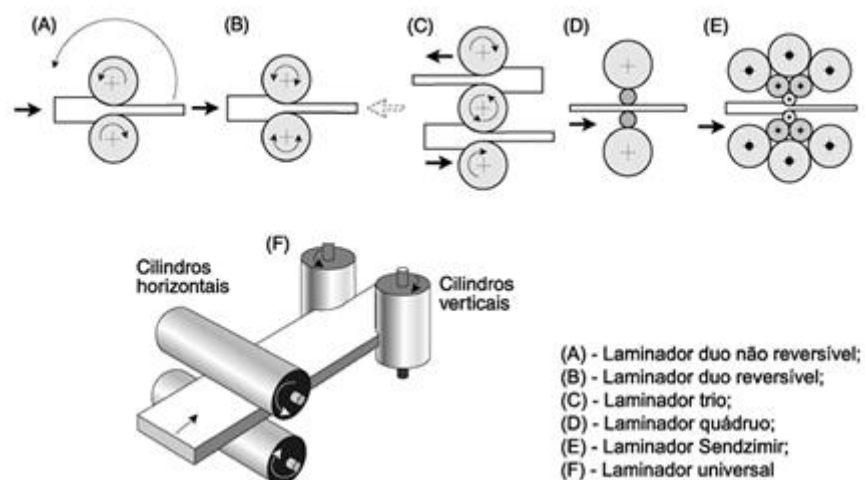
De acordo com Sartori (2004) a obtenção das ligas de alumínio é feita pelo processo de refusão de alumínio metálico, onde o material é carregado nos fornos de fusão podendo estar no estado líquido ou no estado sólido, e posteriormente são adicionados os elementos de liga como o magnésio, o cobre, o silício, o manganês, o zinco, entre outros, além de sucatas selecionadas e refinadores de grão para elaborar e preparar a liga que se pretende obter.

Após obter a composição química da liga, e esta composição deve obrigatoriamente atender as especificações desejadas, o material é então vazado na forma de placas, tarugos ou vergalhões, conforme o produto final (SARTORI, 2004).

2.4 LAMINAÇÃO

A laminação é um processo de transformação mecânica que se baseia na redução da seção transversal utilizando a compressão do metal, por meio da passagem entre dois cilindros de aço ou ferro fundido com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos. A seção transversal tem forma retangular e refere-se aos produtos laminados planos de alumínio e suas ligas, abrangendo desde chapas grossas com espessuras de 150 mm, que são usadas em usinas atômicas, até folhas com espessura de 0,005 mm, usadas em condensadores. Basicamente são dois processos tradicionais de laminação de alumínio: a laminação a quente e laminação a frio. Porém atualmente, a indústria também utiliza a laminação contínua. Na Figura 5 é possível visualizar os tipos de laminadores utilizados, onde as setas indicam o caminho do material (ABAL, 2018).

Figura 5 – Laminadores



Fonte: ABAL, 2018

Dentre os principais tipos de produtos laminados estão às chapas planas ou bobinadas, folhas e discos. Esses produtos possuem diversas aplicações em setores como transportes (carrocerias para ônibus, equipamentos rodoviários, elementos estruturais, etc.), construção civil (telhas, fachadas, calhas, rufos, etc.), embalagens (latas, descartáveis e flexíveis) e bens de consumo (painéis, utensílios domésticos, etc.) (ABAL, 2018).

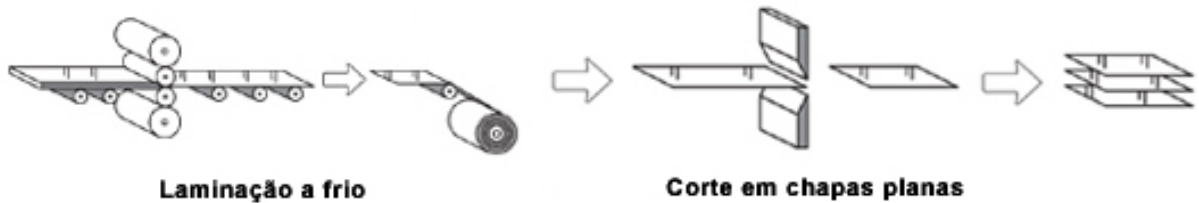
2.4.1 Laminação a Frio

A laminação a frio é feita a temperaturas bem abaixo às de recristalização do alumínio e sua matéria-prima tem origem na laminação a quente. A laminação a frio é normalmente realizada em laminadores quádruplos, sejam eles reversíveis ou não, porém os não reversíveis são mais empregados neste caso. O número de passes varia de acordo com a espessura inicial da matéria-prima, também varia devido à espessura final, da liga e da temperatura do produto solicitado. Os laminadores estão dimensionados para reduções de seções entre 30% e 70% por passe, dependendo, também, das características do material em questão. Alguns laminadores mais sofisticados possuem sistemas computadorizados que são responsáveis pelo controle de espessura e de planicidade. Na laminação a frio utilizam-se dois recursos: tensões avante e tensões a ré (ABAL, 2018).

Segundo o artigo da ABAL (2018), em ambos os tipos de recursos ocorrem o alívio do esforço de compressão exercido pelos cilindros ou aumentam a capacidade de redução por passe. Os recursos de tensões avante e tensões a ré também são responsáveis pela redução da espessura no caso de laminação de folhas finas, em que os cilindros de laminação estão em contato e praticamente sem abertura perceptível.

A laminação a frio produz metal com bom acabamento superficial, além de um preciso controle dimensional e permite uma redução maior da espessura das chapas, além de proporcionar um aumento da resistência mecânica e com isso, o aumento do limite de resistência à tração e escoamento através da diminuição do seu alongamento, estas características se dão por meio do encruamento do material, Tratamentos de recozimento intermediários podem ser realizados para estabelecer a recristalização e para facilitar um posterior processo de laminação. A Figura 6 ilustra o processo de laminação a frio (ABAL, 2018).

Figura 6 – Laminação a frio



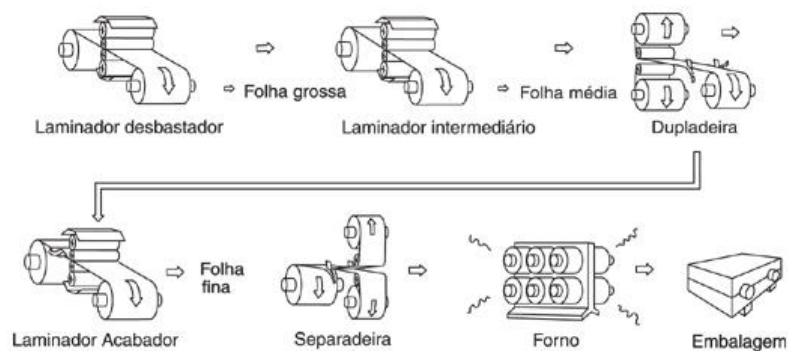
Fonte: ABAL, 2018

A laminação a frio pode oferecer vários tipos de acabamentos em chapas, desde um acabamento sem brilho até um acabamento brilhante como espelhado ou polido (ABAL, 2018).

Os produtos laminados de alumínio são usados em todas as operações metalúrgicas usuais de chapas, incluindo aquelas que exigem do metal de excepcional ductilidade, como é o caso de processos como estampagem, extrusão por impacto, perfilação (roletagem), etc. Recozimentos intermediários podem ser realizados para amolecimento (recristalização) e para facilitar posterior laminação ou determinar têmperas específicas (ABAL, 2018).

Os produtos laminados a frio mais finos, como as folhas que possuem uma espessura de até 0,005 mm, são produzidos em laminadores específicos, que concebem o processo de laminação de folhas duplas com lubrificação entre elas. A Figura 7 ilustra este processo (ABAL, 2018).

Figura 7 – Laminação de folhas



Fonte: ABAL, 2018

2.4.2 Laminação a Quente

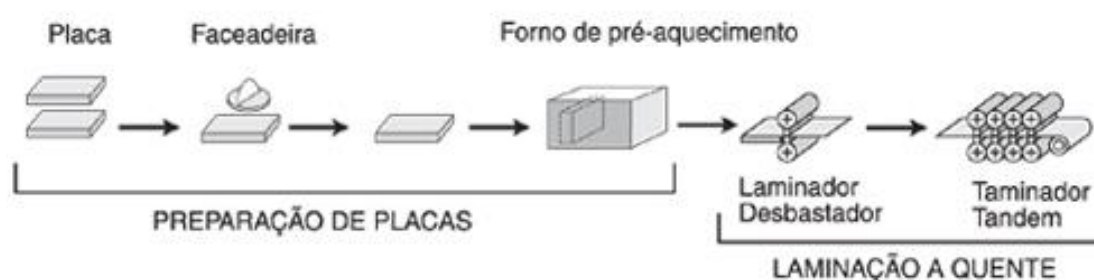
O processo de laminação a quente é a etapa inicial de um processo de laminação, onde o material é aquecido a uma temperatura em torno de 500° C, para que então seja realizado o desbaste das placas (ABAL, 2018).

Esta laminação promove reduções da seção transversal, assim como a laminação a frio, porém com o metal a uma temperatura mínima de aproximadamente 350°C, igual à temperatura de recristalização do alumínio. Neste caso a ductilidade do metal a temperaturas desta ordem é máxima e, nesse processo ocorre, a recristalização dinâmica do material na deformação plástica (ABAL, 2018).

O processo transcorre com um uma placa (matéria-prima inicial) que é produzida na refusão, por meio de fundição semicontínua ou em molde com seção transversal retangular. Esta placa pode sofrer uma usinagem superficial, chamado também de faceamento, para a remoção da camada de óxido de alumínio, dos grãos colunares que se referem ao primeiro material solidificado e das impurezas provenientes da fundição (ABAL, 2018).

Posteriormente, a placa é submetida a um aquecimento até tornar-se semi-plástica, então a laminação a quente se processa em laminadores reversíveis duplos (dois cilindros) ou quádruplos (dois cilindros de trabalho e dois de apoio ou encosto). O material laminado é deslocado em cada passada, por entre os cilindros, sendo que a abertura destes cilindros define a espessura do passe. A redução da espessura por passe é de aproximadamente 50% e depende da dureza da liga que está sofrendo o processo. No último passe de laminação, o material apresenta-se com espessura entre 2,0 e 10 mm, sendo enrolado ou cortado em chapas planas, constituindo-se na matéria-prima para o processo de laminação a frio. Para melhor entendimento a Figura 8 ilustra o processo de laminação a quente (ABAL, 2018).

Figura 8 – Laminação de folhas



Fonte: ABAL, 2018

2.4.3 Laminação Contínua

Conforme descrito pela ABAL (2018), outro processo de laminação atualmente muito utilizado é contínuo que elimina a etapa de laminação a quente. Onde o alumínio é solidificado entre dois cilindros refrigerados internamente por água, que giram em torno de seus eixos, produzindo uma chapa com uma seção retangular e espessura aproximada de 6mm. Após esta etapa, a chapa é enrolada, obtendo-se assim um produto similar àquele obtido por

laminação a quente. Porém, este produto apresentará uma estrutura bruta de fusão bastante refinada, dada a alta eficiência do refinador de grão utilizado no vazamento.

2.5 CASTER

O processo chamado de Roll Caster faz a laminação a frio, é um menos custoso se comparado ao processo tradicional em que as chapas são laminadas a quente. Com o atual avanço tecnológico alcançado já é possível produzir chapas de 2,5 milímetros de espessura contra 6 milímetros em um passado recente, isso indica um ganho de produtividade e de competitividade, devido à bobina sair do processo com uma espessura que exige um número menor de passes na laminação (CESAR, 2004).

Segundo Li (LI, 1995), a produção direta de chapas bobinadas, pelo processo denominado “Twin Roll Caster” (TRC), tornou-se uma prática comum na indústria de alumínio (LI, 1995). O uso da tecnologia Caster, para produtos laminados de alumínio, começou a crescer nos anos 70 e não parou de crescer, ocupando um lugar de destaque na fabricação de bobinas (ALTENPOHL, 1997; BENEDYK, 2001).

O processo Caster utiliza o alumínio líquido que, ao passar por dois cilindros metálicos refrigerados internamente à água tem como resultado uma chapa livre da laminação a quente do processo convencional. Essa técnica mais tradicional e antiga, mo dito no item anterior, parte de um material semi-acabado e fundido a partir da bauxita resultando em placas com espessuras altas e posteriormente, as chapas são formadas em uma temperatura que atinge 500 °C. O Roll Caster elimina esta última etapa da linha de produção, causando uma infraestrutura mais enxuta, com menos mobilização de capital. Um laminador a quente exige em torno de US\$ 150 milhões em investimentos, enquanto a laminação contínua pode ser montada com US\$ 40 milhões particionado em US\$ 10 milhões do Caster e US\$ 30 milhões do laminador a frio. E, elimina-se a necessidade de uma instalação com 200 metros de comprimento para abrigar o laminador a quente, além de gastos com mão-de-obra, consumo de energia elétrica e manutenção (CESAR, 2004).

Sob um ponto de vista operacional, o Caster é considerado mais versátil, ou seja, tem alta vantagem em caso de produção de várias ligas, com fácil ajuste de composição química do metal e produção diversificada na linha de produtos, com larguras maiores. A largura é um dado importante por alguns motivos: inicialmente, a largura média de uma chapa de alumínio era de 85 cm, atualmente o mercado já exige 1,8 metro, essa dimensão proporciona maior produtividade nas aplicações. Por exigir 20% menos investimento em infraestrutura de produção e proporcionar uma redução de cerca de 30% no custo operacional, o Caster

representa metade da capacidade instalada de laminação da indústria de alumínio da América Latina, com 35 máquinas em operação (CESAR, 2004).

Com este processo os produtos que antes sofriam um elevado grau de deformação durante seu processamento agora são obtidos nas dimensões próximas da espessura final desejada. Contudo, ainda existem gargalos significativos com relação à laminação a quente e um deles é a escala reduzida de produção, a média de 10 mil toneladas anuais por máquina, além de problemas no resfriamento do equipamento, que cauda à baixa resistência do material se submetido à estampagem profunda, etapa exigida, por exemplo, na indústria automobilística que utiliza o alumínio em quantidades cada vez maiores. Estas são deficiências do processo Caster já se sabe que fatores como as temperaturas envolvidas nas fases do processo e a velocidade de vazamento, transporte do metal para outro recipiente na produção impactam na textura da chapa laminada (CESAR, 2004).

A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), que fatura US\$ 700 milhões por ano, 50% provenientes de exportações realiza pesquisas sobre Caster há mais de dez anos e devido a esta rota tecnológica produz folhas com espessuras abaixo de 1 milímetro, destinadas a produtos que não precisam de estampagem profunda, como o material utilizado para a produção de embalagens marmitex. A intenção futura da empresa é migrar quase toda a sua produção para esse processo, incluindo também laminados para aplicações em trocadores de calor como radiadores, aparelhos de ar-condicionado, embalagens para a indústria de alimentos, material de transporte etc., ajudando a aumentar a participação e o consumo de alumínio no mercado doméstico mesmo sendo um mercado ainda pequeno, com o consumo per capita de alumínio na faixa de 4 quilos anuais por habitante, contra 29 quilos por ano nos Estados Unidos, a defasagem que pode ser diminuída com a adoção de chapas mais finas de alumínio. (CESAR, 2004).

2.6 RECICLAGEM

A reciclabilidade é uma das características do alumínio e suas ligas que mais se destacam, sabe-se que qualquer liga em qualquer formato poderá ser reciclada inúmeras vezes, sem que sejam perdidas suas características durante o processo, o que difere de alguns outros materiais recicláveis.

O exemplo mais comum de material e reciclagem pode-se ver no processo da lata de alumínio para bebidas em geral, onde a sucata é transformada novamente em lata após a coleta e ao processo de refusão, então sem que haja limites para seu retorno ao ciclo de produção. A sucata deste metal tem valor substancial no mercado de reciclagem, e também apresenta grandes benefícios econômicos e ambientais. Ao utilizar reciclagem tem-se até

95% de economia da energia que é utilizada para produzir alumínio a partir do minério (bauxita), com isso além de agregar valor à reciclagem causa a redução do volume de lixo gerado, contribuindo para a preservação do meio ambiente (SARTORI, 2004).

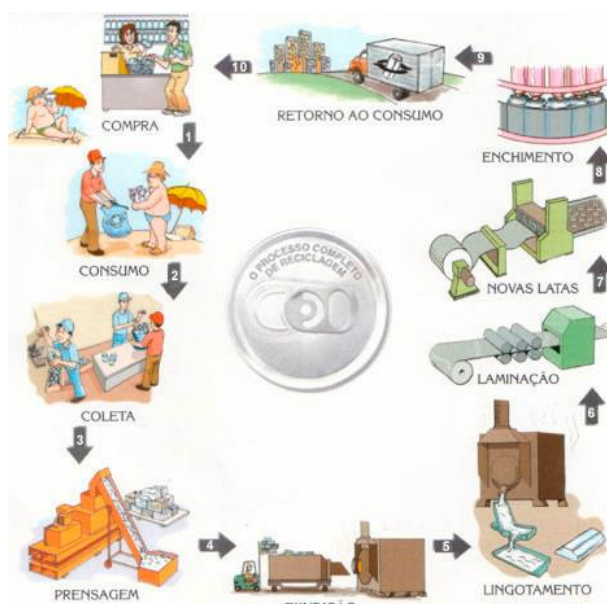
O processo de reciclagem do alumínio tem início com a coleta das latas de bebida realizada pelos processadores de sucata que vendem o material compactado para as empresas de reciclagem depois de limpar impurezas com terra, pedaços de papel etc. Este material vai, inicialmente, para a área fria da reciclagem, então a operação começa com a alimentação dos fardos de latas utilizadas em um desenfardador, que quebra os blocos em pedaços. Uma correia transportadora carrega o material até o moinho de facas, onde os pedaços de blocos são completamente desmanchados, neste ponto têm-se praticamente as latas individualizadas. Na próxima etapa um separador eletromagnético separa metais ferrosos que possam estar misturados ao alumínio e em seguida as latas vão alimentar o moinho de martelos onde serão picotadas, o resultado é conhecido como cavaco. Uma nova separação magnética é realizada como garantia de pureza do metal que será reutilizado, por isso é importante a utilização de uma peneira vibratória para retirar terra, areia e outros resíduos. Depois o separador pneumático completa este processo com jatos de ar que separam papéis, plásticos e outros materiais leves e também pesados, por fim os cavacos seguem para um silo de armazenagem com capacidade de 13 toneladas. Deve-se observar que todos estes equipamentos possuem sistemas de exaustão e as emissões são tratadas em um sistema a frio antes de serem liberadas para a atmosfera (KROM, PERES, PIRES, 2004).

O passo seguinte da reciclagem é a retirada das tintas e vernizes que recobrem os cavacos, isso se faz por meio de um sistema de tecnologia de fluxo simultâneo ar/cavaco no interior de um grande forno rotativo com cerca de 3 metros de diâmetro e 11 metros de comprimento, conhecido como forno Kiln. Os gases que são gerados no processo de remoção de tintas e vernizes são reaproveitados como combustível no próprio forno.

Depois o material passa para o forno de fusão, que possui capacidade de 40 toneladas, dividido em duas câmaras nas quais acontece um sistema de agitação do metal que causa a submersão do cavaco no banho de metal líquido para que ocorra seu derretimento. Este metal líquido é colocado em cadinhos que podem ter 7,5 toneladas de capacidade, neste ponto as amostras de composição química já são retiradas para análise. Por fim, o metal é encaminhado para a laminação de chapas que serão transformadas em latas novamente ou até em outros objetos. Os gases e as impurezas geradas no processo de reciclagem são enviados para a área de tratamento, para garantir total segurança para o meio ambiente (KROM, PERES, PIRES, 2004).

O processo básico de reciclagem do alumínio, desde a compra pelo cliente final é demonstrado pela Figura 9.

Figura 9 - Processo de reciclagem das latas de alumínio



Fonte: Fonte: ABAL, 2018

2.7 CARACTERÍSTICAS DAS CAMADAS DE ÓXIDOS

O alumínio possui um conjunto de propriedades que o tornou um dos metais mais versáteis, atrativos e econômicos para aplicações em diversos setores da metalurgia mundial.

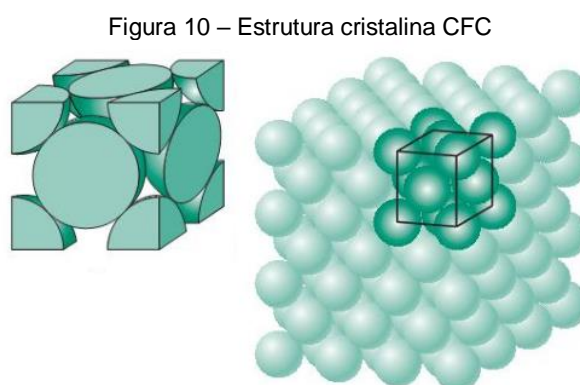
O símbolo do metal alumínio na tabela periódica é o "Al". Mesmo sendo um material leve, apresenta significativa resistência mecânica, e um seu aspecto cinza prateado e fosco, causado devido à fina camada de óxido que se forma quase que imediatamente quando entra em contato com o ar. Apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada (ABAL, 2018). Esta estrutura será apresentada a seguir com maiores explicações.

O alumínio é um metal não tóxico, é não-magnético. Este metal não gera faíscas quando exposto a atrito, como acontece com o aço. Com relação à tensão, o alumínio puro possui baixa tensão aproximada de 19 MPa, o que faz com que suas aplicações como metal estrutural seja restringida, porém é possível aumentar esse valor com o processo de conformação mecânica seja ele por laminação, extrusão ou a adição de elementos de liga podendo chegar a 400 MPa. A utilização de tratamento térmico é outra técnica bastante utilizada para aumentar a resistência mecânica do alumínio (SARTORI, 2004; ABAL, 2018).

Possui densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$, valor que é aproximadamente um terço do aço ($7,8 \text{ g/cm}^3$) ou cobre ($8,9 \text{ g/cm}^3$) (ABAL, 2018). A densidade teórica calculada através de espaçamento do retículo cristalino é $2698,72 \text{ kg/m}^3$ (MONDOLFO, 1976). Dos outros metais mais usados, apenas o magnésio e o titânio são mais leves e a baixa densidade é uma qualidade altamente observada em metais e suas ligas, sendo uma das principais razões pela

qual o alumínio possui uma grande aceitação no segmento da indústria de transportes (COBDEN, 1991).

A estrutura cristalina na qual o alumínio é estável é a chamada cúbica de face centrada (CFC), variando de temperaturas de -269°C até o seu ponto de fusão, aproximadamente 660°C (COBDEN, 1991). Ainda segundo Cobde na estrutura cristalina cúbica de face centrada é a estrutura típica de metais dúcteis e o número de coordenação para esse elemento é o 12, sendo quatro átomos na célula unitária. O típico arranjo atômico da estrutura cristalina pode ser observado na Figura 10.



Fonte: Brasilescola, 2018

O alumínio é muito maleável, dúctil e apto para a conformação e para fundição, além de possui uma excelente resistência à corrosão e também durabilidade devido à camada sua protetora de óxido. É o segundo metal mais maleável, perdendo apenas para o ouro, e o sexto mais dúctil e também é um bom condutor de calor devido a essa qualidade é muito utilizado em utensílios domésticos (ABAL, 2018).

Como dito anteriormente, segundo ABAL (2018) o alumínio é abundante na natureza, porém não é possível encontrá-lo na sua forma elementar e sim como óxidos e silicatos. É trivalente em seus compostos, como a alumina Al_2O_3 ou cloreto AlCl_3 . A característica mais chamativa deste metal é a formação natural de uma camada de óxido (Al_2O_3) sobre a sua superfície quando em contato com o ar. Logo no início de sua formação esta camada de óxido mede cerca de 1,5 mm, entretanto a taxa de crescimento subsequente decresce de maneira que a espessura de óxido normal fica por volta de 25 a 50 Å. Mesmo esta camada de óxido sendo extremamente fina, ela é suficiente para proteger com excelência o metal do ambiente corrosivo. Este fenômeno justifica a excelente resistência à corrosão do alumínio e suas ligas (ALCAN, 1993).

O óxido de alumínio é dissolvido em algumas soluções químicas, tais como ácidos fortes e álcalis, levando à rápida corrosão. O óxido filme é geralmente estável em uma faixa de valores de pH entre 4,0 e 9,0, com água solúvel espécies que se formam a valores baixos de pH Al_3^+ e pH alto AlO_2^- (MUTOMBO, TOIT, 2011).

A camada de óxido tem mais benefício como a tenacidade, aderência, impermeabilidade e se funde somente a 2052 °C. Além disso, todas as vezes que o metal sofre um processo onde a camada é removida, por exemplo, um corte ou uma solda, uma nova reação com o ambiente acontece e outra camada se forma sobre a superfície do metal. O óxido é o material que possui maior dureza, depois do diamante, devido a isso ele é extremamente empregado na fabricação de ferramentas abrasivas para rebolos de esmeril. A camada protetora acontece porque o alumínio é altamente reativo ao contrário da camada de óxido que é pouco reativa, a camada de óxido protege o metal até mesmo contra alguns tipos de ácidos. A menos que o alumínio fique em exposição a algum tipo de substância ou a ambientes agressivos, como ambientes alcalinos, que destruam essa camada de óxido o metal fica completamente protegido contra oxidação.

Sua superfície possui um aspecto poroso possibilitando a retenção de umidade ou contaminantes nestes poros, os quais podem causar algum tipo de defeito estético no metal, muito comum durante a soldagem de uma liga de alumínio-magnésio, por exemplo, porque a camada que se forma nessa liga se hidrata com facilidade (ALCAN, 1993).

Com relação à condutividade térmica, essa característica coloca o alumínio como um excelente meio de transferência de energia térmica tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Devido a essa característica faz com que ele seja um dos metais mais utilizados na fabricação de latas de bebidas e utensílios domésticos. Devido à condutividade elétrica o alumínio muitas vezes é utilizado no lugar do cobre, pois apresenta as mesmas características mecânicas, porém com apenas a metade do peso. Quando utilizado para fabricação de condutores é aconselhável que se utilize ligas do grupo 1XXX, alumínio mais puro, pois a presença de elementos de liga atua como barreiras restringindo a condução de eletricidade (SARTORI, 2004).

Mais uma qualidade das ligas de alumínio é barreira à luz, que é impermeável à ação de umidade e do oxigênio, o que faz da folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens. Todas as características citadas tornam a aplicação do alumínio e de suas ligas vantajosa em variados segmentos da indústria, desde utensílios domésticos à indústria aeronáutica ou automobilística. Outra vantagem em seu uso é a reciclabilidade, o alumínio pode ser infinitamente reciclado, o que gera grande economia de matéria-prima, de energia e menor descarte de resíduos. Por fim, o alumínio pode combinar-se com a maioria dos metais de engenharia abrindo um grande leque de aplicações (ABAL, 2018).

2.8 ELEMENTOS DE LIGA

O fato de o alumínio combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, conhecidos

como elemento de liga o coloca com destaque no mercado metalúrgico. Com essas associações, é possível conseguir características tecnológicas ajustadas conforme a aplicação do produto final. Entretanto para isso, é necessário conhecer bem as vantagens e limitações de cada elemento de liga para fazer a seleção mais adequada (ABAL, 2018).

O abrangente leque das ligas oferece às indústrias uma variedade de combinações, afim de, atender os critérios de resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas do meio, condutividade elétrica, usinabilidade, ductibilidade, formabilidade, entre outros critérios (RUTTER, 2011).

A funcionalidade dos elementos da liga se altera conforme a quantidade dos elementos e com a sua interação com os demais elementos presentes. De um modo geral, é possível dividir os elementos entre os elementos que conferem à liga a sua característica principal (como a resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez, etc.) e os elementos que têm função acessória como o controle de microestrutura, controle de impurezas entre outras funções (RUTTER, 2011).

Segundo Rutter (2011), uma das preocupações da indústria do alumínio é a presença dos elementos mais pesados nas ligas de alumínio, pois são metais altamente reativos e bioacumuláveis, ou seja, os organismos não possuem a capacidade de eliminá-los. Com uma análise química, os metais pesados são aqueles definidos como um grupo de elementos situados entre o cobre e o chumbo na tabela periódica com pesos atômicos entre 63,546 e 200,590 e com densidade superior a $4,0 \text{ g/cm}^3$ (RUTTER, 2011).

De um modo geral, as ligas de alumínio são classificadas em dois grupos de fabricação, as fundidas e as trabalháveis, a designação para identificar estes grupos de ligas são números com quatro dígitos, o qual indica o grupo da liga, algumas impurezas presentes e também o grau de pureza do metal. Para ligas fundidas é colocado um ponto decimal entre os dois últimos dígitos o que indica o tipo de tratamento termomecânico que a liga foi submetida (CALLISTER, 2008).

A liga comercialmente pura refere-se as do grupo 1XXX, elas possuem 99% de alumínio e pequenas quantidades de impurezas, ou seja, outros componentes químicos (ABAL, 2003).

Um ponto a ser analisado quando se fala do alumínio é a sua resposta aos mecanismos de corrosão, e quando é abordado esse tema, requer melhor entendimento, exploração e explicação, pois determinadas ligas de alumínio possuem sim respostas excelentes a ambientes corrosivos, porém podem ser ligeiramente afetadas pela falta de conhecimento de suas propriedades físicas ou químicas.

É importante saber que todas as ligas não se comportam da mesma forma quando expostas ao mesmo ambiente, por exemplo, a liga AA2024 normalmente apresentara menor resistência à corrosão em um determinado ambiente do que a liga AA3003. Como alguns

grupos de média e baixa resistência mecânica mostram resistência similar à corrosão na maioria dos ambientes, torna-se então indispensável os testes antes de se utilizar ligas de alumínio para uma determinada aplicação (ABAL, 2003).

As ligas trabalháveis que são possíveis obter estão divididas em 2 grupos onde um grupo é formado pelas ligas não-tratáveis termicamente e o outro grupo é composto pelas ligas tratáveis termicamente. Para um melhor entendimento sobre a designação das ligas trabalháveis, a Figura 11, mostra com detalhes a série das ligas e algumas de suas aplicações (SARTORI, 2009).

Figura 11 – Designação das ligas trabalháveis

<u>Elemento de Liga Principal ou % Al</u>	<u>Ligas Séries</u>	<u>Aplicações</u>
99.00 % de pureza mínima do Alumínio	1XXX	Folhas, Chapas para, Litogravura e Condutores
Cobre	2XXX	Aviação e Aeroespacial
Manganes	3XXX	CBS, Chapas para Apl. Civil, Painelas, Aletas
Silício	4XXX	Brazagem/Cladding Sheet
Magnésio	5XXX	CES, Automotivo, Revenda, Tanques
Magnésio e Silício	6XXX	Ferramentas, Automotivo
Zinco	7XXX	Aviação e Aeroespacial
Outros Elementos	8XXX	Folhas(Fe), Aeroespacial (Li)
Serie não Usada	9XXX	

O primeiro dígito classifica a série de liga ou o elemento de liga principal.

O segundo dígito significa uma modificação da liga original.

O terceiro e quarto dígito significa uma sequência de registro da liga ou para série 1XXX o grau de pureza.

Fonte: Sartori, 2009

De acordo com Sartori (2009), como mostra a Figura 11, o primeiro dos quatro dígitos da classificação indica o grupo de ligas. O segundo dígito refere-se às modificações na liga original ou dos limites de impurezas e os dois últimos dígitos referem-se à sequência de registro da liga em cada grupo. Para ligas da série 1XXX, existe a particularidade de indicar o grau de pureza (SARTORI, 2009).

2.8.1 Ligas Trabalháveis Não-Tratáveis Termicamente

As ligas trabalháveis conhecidas como não-tratáveis termicamente são aquelas em que o aumento das propriedades mecânica é obtido apenas por meio de trabalhos a frio, por

exemplo, laminação e trefilação. Quando ocorre de as propriedades ficarem muito altas, acima do suportado pela aplicação, então estas propriedades podem ser diminuídas por meio do aquecimento em determinadas temperaturas (ALCAN, 1993).

Aparte que compõem o grupo das ligas não-tratáveis termicamente são as ligas 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX.

2.8.2 Ligas Trabalháveis Tratáveis Termicamente

As tratáveis termicamente são as ligas que apresentam a característica de interagir e reagir a tratamentos térmicos e com isso conseguem alcançar um aumento apreciável de sua resistência mecânica (ALCAN, 1993).

Os tratamentos térmicos que possibilitam o aumento da resistência mecânica dessas ligas são conhecidos com solubilização o envelhecimento. Além disso, essas ligas possuem em sua composição química determinados elementos de liga que conseguem aumentar sua solubilidade com a ajuda da temperatura (ALCAN, 1993).

Após, realizada a solubilização, a liga está em situação instável, seus elementos tendem a sair da solução sólida, formando compostos intermetálicos precipitados na matriz. Esses precipitados são finos e bem distribuídos e proporcionam o endurecimento da liga (ALCAN, 1993).

2.8.3 Série de Ligas de Alumínio

Para Dean (1990), existem mais de cem elementos químicos na tabela periódica que podem formar ligas com o alumínio, ou seja, uma grande variedade de possíveis ligas. No entanto, segundo Zangrandi (2008) como muitos desses elementos são raros, ou outros são considerados tóxicos, nocivos ou ainda não possui interesse comercial, esta variedade de combinação de elementos com o alumínio se torna reduzida a poucos elementos (DEAN, 1990; ZANGRANDI, 2008).

Atualmente os principais elementos de liga que combinam com o alumínio são o cobre, o manganês, o silício, o zinco e o magnésio (ZANGRANDI, 2008). Além dos elementos que ajudam a formar as principais ligas de alumínio referidos anteriormente, tais elementos como cromo, titânio, níquel, cobalto e zircônio. Estes são normalmente adicionados às ligas de alumínio com finalidades específicas, enquanto que alguns outros elementos, conhecidos como impurezas são considerados indesejáveis (DEAN, 1990).

2.8.3.1 Ligas 1XXX

As ligas do grupo 1XXX são compostas por alumínio de pureza 99,00% ou superior. Estas ligas possuem muitas aplicações, especialmente nos campos da eletricidade e química, e caracterizam-se pela excelente resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica, trabalhabilidade e baixa propriedade mecânica. O aumento desejado na resistência mecânica pode ser obtido pelo endurecimento por deformação (encruamento). No caso do grupo 1XXX o ferro e silício são as maiores impurezas (SARTORI, 2004).

2.8.3.2 Ligas Alumínio – Cobre 2XXX

O cobre é um elemento que possibilita o aumento da resistência mecânica e proporciona o endurecimento por precipitação natural, causa a diminuição da resistência à corrosão, da ductilidade e da soldabilidade da liga (ZANGRANDI, 1990).

Nestas ligas o cobre é o elemento de liga principal, elas requerem tratamento térmico de solubilização para obter propriedades mecânicas adequadas (similares e às vezes superiores às do aço doce). Em determinados casos o envelhecimento artificial é utilizado para uma posterior elevação das propriedades mecânicas, este tratamento causa o aumento do limite de escoamento, como conseqüente diminuição do alongamento. As ligas na série 2000 possuem resistência à corrosão consideravelmente limitada em comparação a outras ligas de alumínio e sob certas condições podem ser sujeitas à corrosão intergranular. Assim, estas ligas em formas de chapas geralmente possuem uma proteção com uma liga de alta pureza ou uma liga de magnésio silício da série 6000, a qual oferece a proteção galvânica ao material do núcleo, aumentando muito a resistência à corrosão. A liga AA2024 é talvez a mais conhecida do grupo, é amplamente utilizada na indústria aeronáutica (SARTORI, 2004).

2.8.3.3 Ligas Alumínio – Manganês 3XXX

O manganês é o elemento de liga principal nas ligas deste grupo, que geralmente não são tratáveis termicamente. Como apenas uma porcentagem limitada de manganês, cerca de 1,5%, pode ser efetivamente adicionada ao alumínio, ele é usado como elemento principal em apenas algumas ligas. Uma delas, no entanto, é a popular AA3003, que é bastante utilizada como liga de utilização genérica para aplicações de esforços moderados, requerendo boa trabalhabilidade (SARTORI, 2004).

O manganês gera o aumento da resistência mecânica do alumínio comercialmente puro com uma pequena redução da ductilidade, e também aumenta a resistência à corrosão

(RIOS, PADILHA, 2003).

Ligas de manganês AA3003 possuem boa resistência a corrosão e é considerada um pouco superior a liga AA1100, em caso de aplicações onde se deseja a resistência mecânica adicional. As ligas das séries 2XXX e 7XXX, que possuem o cobre em sua composição, a despeito de suas elevadas propriedades mecânicas, são raramente utilizadas na indústria química e de alimentos, pois, não possuem um alto grau de resistência a corrosão geralmente requerida (ABAL, 2003).

2.8.3.4 Ligas Alumínio – Silício 4XXX

Neste grupo o elemento de liga principal é o silício e pode ser adicionado em quantidades suficientes para causar a queda do ponto de fusão sem produzir fragilização nas ligas resultantes. Devido a isso, ligas de alumínio e silício são utilizadas para fios de solda e como ligas para brasagem, onde é necessário um ponto de fusão mais baixo do que a metal base. Muitas ligas nesta série não são tratáveis termicamente. As ligas que contêm quantidades apreciáveis de silício tornam-se cinza escuro quando submetidas à anodização (SARTORI, 2004).

O silício além de diminuir a temperatura de fusão ele provoca o aumento da fluidez da liga, aumenta sua resistência mecânica e melhora a ductilidade. (ZANGRANDI, 1990).

2.8.3.5 Ligas Alumínio – Magnésio 5XXX

Neste caso o magnésio causa a redução da temperatura de fusão, além de aumentar a capacidade de endurecimento por deformação e a resistência à corrosão da liga, por exemplo, em água salgada (ZANGRANDI, 1990).

A adição de magnésio e manganês em alguns grupos propiciam o aumento da sua resistência mecânica, resistência a corrosão e favorecem as características desejadas para um determinado equipamento (ABAL, 2018).

O magnésio é um dos elementos de liga para o alumínio, mais efetivos e amplamente utilizados. Quando usado como elemento de liga principal ou em conjunto com o manganês, resulta em ligas não tratáveis termicamente com resistência mecânica de moderada a alta. O magnésio consegue se portar de forma mais efetiva do que o manganês. Ao trabalhar como endurecedor, ao comparar estes dois elementos, cerca de 0,8% de magnésio equivale a 1,25% de manganês e pode ser adicionado em quantidades consideravelmente maiores. Ligas desta série proporcionam boas características de soldagem e boa resistência à corrosão em atmosfera marítima, entretanto, algumas limitações devem ser observadas na quantidade

de trabalho a frio e nas temperaturas de trabalho permitidas para as ligas que contenham teores de magnésio acima de 3%, de forma a evitar suscetibilidade à corrosão sob tensão e esfoliação (SARTORI, 2004).

2.8.3.6 Ligas Alumínio – Magnésio – Silício 6XXX

Ligas neste grupo possuem silício e magnésio em proporções aproximadas com o intuito de formar o precipitado Mg_2Si , fazendo com que sejam tratáveis termicamente. A principal liga desta série é a AA6061, uma das mais versáteis e tratáveis termicamente. Apesar de terem menor resistência mecânica do que a maioria das ligas dos grupos 2000 ou 7000, as ligas de magnésio e silício possuem boa formabilidade e resistência à corrosão com média resistência mecânica (SARTORI, 2004).

O silício quando adicionado juntamente com o magnésio propicia o endurecimento por precipitação (ZANGRANDI, 1990).

2.8.3.7 Ligas Alumínio – Zinco 7XXX

O zinco é o elemento de liga principal nesta série e quando combinado com pequenas quantidades de magnésio causa em ligas tratáveis termicamente de alta resistência mecânica, outros elementos como o cobre e o cromo, também são adicionados em pequenas quantidades. A liga mais conhecida deste grupo é a AA7075, que está entre as mais resistentes disponíveis, por isso, é utilizada em estruturas aeronáuticas entre outras aplicações que requerem elevada resistência mecânica. Para estas ligas a resistência à corrosão é bem similar à das ligas da série 2000 (SARTORI, 2004).

O zinco proporciona o aumento acentuado da resistência mecânica do alumínio ao oferecer o endurecimento por precipitação natural e artificial da liga, entretanto, tem pouco efeito e pouca contribuição para endurecimento por deformação, quando presente em solução sólida (ZANGRANDI, 2008).

2.8.3.8 Ligas Alumínio Série 8XXX

Esta série é utilizada para a designação de ligas que não se enquadram nas séries citadas anteriormente (SARTORI, 2004).

2.8.4 Influência Dos Elementos de Liga

Neste item serão apresentadas à influência dos elementos de liga, que não foram citados no item anterior porque não se caracterizam como um grupo de ligas, mas que podem ser adicionados para obter a propriedade desejada.

2.8.4.1 Cromo

O cromo pode ser adicionado nas ligas de alumínio, porém a difusão do cromo no alumínio é baixa, e provoca à formação de finos e dispersos precipitados nas ligas trabalháveis, esses precipitados inibem de certa forma a nucleação e o crescimento de grão. O cromo é usado para ajudar no controle do tamanho de grão e prevenir o crescimento nas ligas de alumínio-magnésio, este elemento inibe a recristalização nas ligas de alumínio-magnésio-silício ou alumínio-magnésio-zinco durante a deformação a quente ou tratamento térmico. O cromo em solução sólida e na forma de finos precipitados causa um leve aumento da resistência mecânica das ligas. Normalmente, é adicionado em quantidades entre 0,1% a 0,3% e tem uma influência benéfica quanto se trata de resistência à corrosão. O cromo causa à melhora da resistência à corrosão sobre tensão de algumas ligas (SARTORI, 2004).

2.8.4.2 Alumínio – Cobre

As ligas de alumínio-cobre tanto como fundida como na forma trabalhável, respondem de maneira positiva ao tratamento de solubilização e subsequente envelhecimento com o aumento da resistência mecânica e dureza e uma redução do alongamento. O cobre causa a redução da resistência à corrosão mais do que os outros elementos de liga, quando este é adicionado em pequenas quantidades, por exemplo, 0,15%, diminui a taxa de penetração do pite que é um dos tipos de corrosão (SARTORI, 2004).

2.8.4.3 Ferro

O ferro possui baixo nível de solubilidade no alumínio no estado sólido, aproximadamente 0,04%, por isso a maioria do ferro presente no alumínio acima dessa quantidade está na forma de precipitados de segunda fase geralmente em combinação com alumínio ou outros elementos como, por exemplo, o manganês. O ferro causa a redução do tamanho de grão em ligas trabalháveis. As ligas de ferro e manganês, como a AA8006 tem

uma combinação de resistência mecânica e ductilidade a temperatura ambiente e mantém a essa resistência a temperaturas elevadas, essa propriedade é devido aos finos precipitados de segunda fase ricos em ferro mantendo uma estrutura de grãos finos. O ferro também gera uma influência maléfica quanto à resistência à corrosão, devido a isso, a quantidade de ferro deve ser mantida baixa quando é necessária uma boa resistência à corrosão (< 0,8%) (SARTORI, 2004).

2.8.4.4 Magnésio

O magnésio possui máxima solubilidade no alumínio de 17,4%, mas nas ligas trabalháveis comercializadas atualmente este valor não ultrapassa 5,5%. O magnésio tem sua precipitação preferencialmente no contorno de grão na forma de Mg_2Al_3 ou Mg_5Al_8 que são partículas anódicas em relação à matriz da liga, essas fases quando estão presentes em rede contínua no contorno de grão faz com que material seja susceptível a corrosão sob tensão ou esfoliação. O magnésio tem a vantagem de aumentar a resistência mecânica da liga sem diminuir a sua ductilidade e possui a influência benéfica na resistência à corrosão, ligas de Al-Mg possuem elevada resistência em ambientes marinhos, porque, o magnésio aumenta a resistência à corrosão das ligas de alumínio em soluções alcalinas como óxido de cálcio e carbonato de sódio (SARTORI, 2004).

2.8.4.5 Manganês

O elemento de liga manganês possui uma limitada solubilidade no alumínio, ele aumenta a resistência mecânica quando em solução sólida ou na forma de finos precipitados, e também causa o aumento da temperatura de recristalização. É muito utilizado no controle do tamanho de grão, pois quando os precipitados estão dispersos na matriz de alumínio eles retardam a recuperação e previne o crescimento de grão. O manganês tem leve efeito benéfico quando se trata d resistência à corrosão, e em determinadas ligas é adicionado em pequenas quantidades substituindo o cromo, para obter melhor resistência à corrosão sobre tensão (SARTORI, 2004).

2.9 CLASSIFICAÇÃO DE TÊMPERAS EM ALUMÍNIO

O termo têmpera quando se refere às ligas de alumínio, indica o estado em que o material adquire pela ação ou durante um trabalho, seja este a quente ou a frio, ou algum

tratamento térmico ou pela combinação dos dois, os quais irão determinar influências decisivas sobre a estrutura e propriedades de um produto acabado. O sistema de nomenclatura de têmperas é baseado em letras, e as subdivisões dessas têmperas básicas são determinadas por números que especificam as principais operações que o material deve sofrer (ALCAN, 1993).

Para Alcan (1993), este define que se uma variante da sequência de operações tiver de serem realizados, novos dígitos serão acrescentados à designação inicial.

- Têmperas “F” (como fabricado): Designam os produtos que não se exerceu nenhum controle sobre as condições térmicas ou nível de encruamento, com isso, não se especificam limites para as propriedades mecânicas (ALCAN, 1993).

- Têmperas “O” (recozido): Indica os produtos acabados no estado em que apresentam o menor valor de resistência mecânica (ALCAN, 1993).

- Têmperas “H” (encruado): Refere-se às ligas não-tratáveis termicamente, em que a alta resistência mecânica é obtida por meio de deformação plástica a frio e que podem ser submetidas a recozimento complementar, a fim de proporcionar o amolecimento parcial ou a um processo de estabilização. Dígitos adicionais indicam o nível de encruamento necessário ou algum tratamento que possa influenciar as propriedades obtidas (ALCAN, 1993).

- Têmperas “W” (solubilizado): Esta têmpera é aplicada somente em algumas ligas, as quais envelhecem naturalmente em temperatura ambiente após tratamento de solubilização (ALCAN, 1993).

- Têmperas “T” (tratado termicamente): Indica as ligas tratáveis termicamente, onde é produzidas propriedades mecânicas estáveis, diferentes de “F”, “O”, e “H”, com ou sem encruamento complementar. A letra “T” deve ser seguida por um ou mais dígitos (ALCAN, 1993).

De acordo com ALCAN (1993) a têmpera “H” possui dígitos adicionais, sendo o primeiro dígito que segue à letra “H”, a combinação das operações básicas, como a seguir:

- “H1” - Somente Encruamento: Defini os produtos que sofreram alguma deformação plástica a frio a fim de se obter a resistência mecânica desejada sem recozimento complementar. E o segundo dígito desta designação indica o grau de encruamento (SARTORI, 2004).

- “H2” - Deformado Plasticamente a Frio e Parcialmente Recozido: É aplicado aos produtos que sofreram deformações plásticas a frio em grau maior do que o desejado e posteriormente é recozido com o intuito de reduzir a sua resistência ao nível especificado. Para as ligas que tem a característica de amolecer espontaneamente à temperatura ambiente, as têmperas H2 têm a mesma resistência à tração mínima que as têmperas H1 com alongamento ligeiramente superior. O segundo dígito desta designação determina o grau de

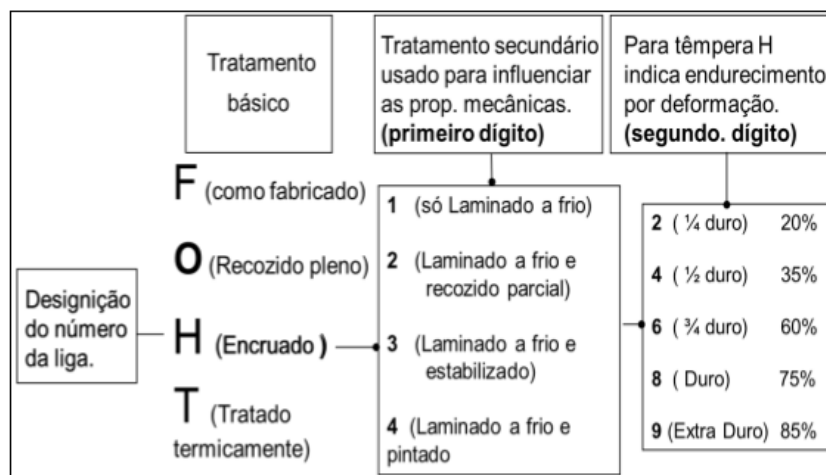
encruamento que permanece depois que o produto foi parcialmente recozido (SARTORI, 2004).

- “H3” - Deformado Plasticamente a Frio e Estabilizado: É utilizada nos produtos que sofreram uma deformação plástica a frio e cujas propriedades mecânicas precisam ser estabilizadas por um tratamento térmico a baixa temperatura, o resultado é uma resistência à tração ligeiramente menor e uma melhor ductilidade. Esta designação aplica-se as ligas que possuem magnésio que, se não forem estabilizadas, amolecem gradativamente à temperatura ambiente. Neste caso, o segundo dígito desta designação indica o grau de encruamento antes do tratamento de estabilização (SARTORI, 2004).

- H4 - Deformado Plasticamente a Frio e Pintado ou Envernizado: É aplicado aos produtos deformados a frio que são submetidos a uma operação de pintura ou envernizamento. E neste caso, o segundo dígito desta designação indica o grau de encruamento residual após o produto ser tratado termicamente como parte da operação de cura da pintura ou verniz. Os limites de propriedades mecânicas correspondem às têmperas H2X ou H3X (SARTORI, 2004).

O segundo dígito indica o grau de encruamento em ordem crescente, o dígito “8” designa a têmpera obtida por uma dada liga que sofreu uma redução mecânica a frio de aproximadamente 75%, após um recozimento pleno (ALCAN, 1993). As principais têmperas são as mostradas na Figura 12:

Figura 12 - Têmperas em Alumínio F, O, H ou T



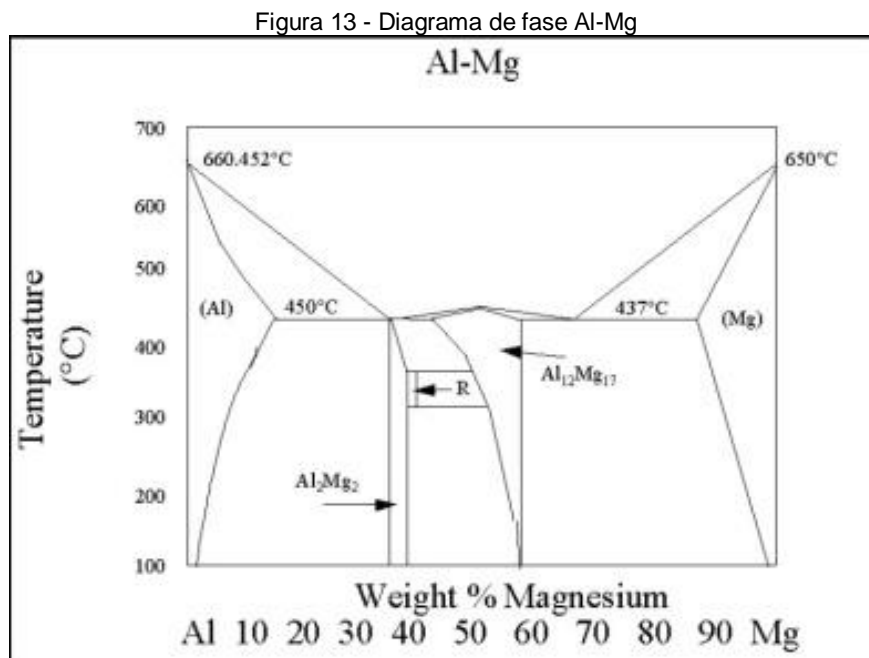
Fonte: Sartori, 2009

O Terceiro dígito, quando usado, indica a variação de uma têmpera de dois dígitos. É utilizado quando o grau de controle da têmpera ou as propriedades mecânicas diferem, entretanto são próximas daquelas para a têmpera “H” com dois dígitos ao qual é adicionado ou quando alguma outra característica é afetada de maneira significativa. Com relação ao limite mínimo de resistência à tração de uma têmpera “H” de três dígitos deve ser mais próximo

do limite mínimo de resistência à tração da tempera “H” de dois dígitos correspondentes do que do limite mínimo das temperas H de dois dígitos adjacentes (SARTORI, 2004).

2.10 CARACTERÍSTICAS DA LIGA AA5083

Como dito anteriormente, o magnésio é o elemento de liga principal nas ligas não tratadas termicamente da série 5XXX, tendo sua solubilidade máxima no alumínio de 17,4%, entretanto a quantidade de magnésio nas ligas de alumínio trabalhadas geralmente não ultrapassa 5,5%. Sabendo que nas ligas com mais de 3% de magnésio, este precipita preferencialmente nos contornos de grão como uma fase anódica (Mg_5Al_8), podendo ocasionar a susceptibilidade da ocorrência de trincas intergranulares e corrosão sob tensão. As ligas trabalhadas contendo um valor maior do que 3% de magnésio e que foram propriamente fabricadas são estáveis sob condições normais de uso. A Figura 13 mostra o diagrama de fase Al-Mg. (AVEDESIAN, BAKER, 1999).



Fonte: Avedesian e Baker, 1999

A resistência das ligas 5XXX provém do endurecimento por solução sólida devido ao magnésio, contudo outros elementos de liga como cromo, manganês, zircônio também são adicionados para ajudar no controle das estruturas de grão e subgrão, e também podem contribuir para o aumento de resistência do alumínio. O manganês é geralmente adicionado às ligas da série 5XXX para proporcionar maior aumento de resistência da liga a baixos níveis de magnésio. Entretanto, essa adição pode diminuir o tamanho de grão recristalizado,

dependendo das condições do processo (MINATEL, 2009).

A Liga AA5083 é uma liga com uma resistência média, não tratada termicamente, o que lhe fornece excelente resistência a corrosão. Porém, pode tornar-se susceptível ao ataque intergranular e a trincas de corrosão intergranular devido à tensão quando exposta a temperaturas variando entre 50 a 200°C pôr tempo suficientemente longo (SARTORI, VEIGA, 2005).

Este fenômeno é altamente relacionado com a dissolução seletiva da fase β (Mg_2Al_3 ou Mg_5Al_8), a presença destas fases anódicas em relação à matriz favorece a corrosão em trajetórias nas proximidades dos mesmos (SARTORI, VEIGA, 2005).

As ligas da série 5XXX são tecnologicamente muito importantes na classe de ligas estruturais, por serem leves, com excelente soldabilidade, formabilidade e resistência à corrosão, tornando-as adequadas para uma ampla gama de transporte marítimo e aplicações marítimas. Listas comuns de ligas de alumínio da série 5XXX, isto inclui a AA5083 com a composição nominal de Al-4.5Mg-0.5 Mn, normalmente possuem uma composição contendo uma supersaturação de Mg, isto é valor maior ou igual a 3,5% em peso para otimizar o fortalecimento da solução sólida. É possível uma supersaturação de Mg como a liga é extinta durante o processamento, permitindo que um alto teor de Mg permaneça em solução sólida (ZHANG, ZHANG, YAN, THOMAS, DAVIES, BIRBILIS, 2017).

É importante destacar algumas características específicas como a densidade da liga que é de 2,66g/cm³, o módulo de elasticidade: 70,0N/mm², o coeficiente de expansão linear é dado pelo valor 24,2x10⁻⁶/K, condutividade térmica é igual a 110-140W/mK e a condutividade elétrica é de 16-19 m/ Ω *mm², o calor específico está em torno de 900J/kg*K. A liga 5083 possui limite de resistência à tração de 290 MP, limite de escoamento de 145 Mpa, alongamento típico por volta de 22 % em 50mm dureza HB (2,5/62,5) no valor de 73-75 HB (GLEICH, 2015).

2.11 SENSITIZAÇÃO

A precipitação indesejável da fase β em AA5083 em série é um fenômeno que é comumente chamado de "sensibilização" (sensitização). A fase β é anódica em relação à matriz, de modo que durante a exposição em circuito aberto de ligas de alumínio série 5XXX, a fase β é preferencialmente dissolvida em ambientes aquosos (ZHANG, ZHANG, YAN, THOMAS, DAVIES, BIRBILIS, 2017).

A dissolução preferencial da fase β é um problema específico para os grãos precipitação da fase β limite, pois resulta em corrosão intergranular. O método padrão para avaliar o chamado grau de sensibilização para ligas de Al-Mg é baseada na perda de massa

em teste de ácido nítrico, que mede a perda de massa na área da superfície das amostras expostas após 24 horas no ácido concentrado (70% em peso) por imersão a 30°C (ZHANG, ZHANG, YAN, THOMAS, DAVIES, BIRBILIS, 2017).

Dadas as amplas aplicações das ligas de alumínio da série 5XXX, é de alta importância prevenir, controlar ou eliminar os efeitos ocasionados pela corrosão intergranular causada pela sensibilização. No contexto da produção de ligas resistentes, se teve vários trabalhos realizados com objetivo de testar o comportamento das ligas da série 5XXX, incluindo o desenvolvimento de ligas de Al-Mg com adições de Sr, Nd e Zn (estrôncio, neodímio e zinco). Em todos os casos citados, acredita-se que os elementos de liga sejam capazes de diminuir a fração volumétrica da fase β ou interromper a sua continuidade ao longo dos limites de grãos. Outras formas de transmitir a resistência incluem determinados métodos de processamento como, por exemplo, a deformação plástica onde acontece o refino do tamanho de grão ou é alterada a características de contorno de grão, os métodos citados são preventivos para a resistência à sensibilização. O calor no tratamento de ligas de Al-Mg sensibilizadas diminui o nível de sensibilização, medida pela análise após o banho de ácido nítrico, que potencialmente oferece uma solução para os problemas existentes na corrosão intergranular (ZHANG, ZHANG, YAN, THOMAS, DAVIES, BIRBILIS, 2017).

Mesmo os tratamentos de reversão sendo conhecidos por na prática reduzir a sensibilização, estudos sobre o tratamento de reversão de ligas da série 5XXX são escassos. A re-exposição de amostras sensibilizadas, por exemplo, a AA5456-H116, a uma temperatura que varia entre 200°C e 240°C por apenas 1h, causaria a diminuição do grau de sensibilização (ZHANG, ZHANG, YAN, THOMAS, DAVIES, BIRBILIS, 2017).

Resultados semelhantes puderam ser reivindicados após a exposição da liga AA5083-H116 a temperaturas entre 230 e 250°C durante 10 a 30 minutos. No contexto da reversão, apesar do limitado número de experimentos do fenômeno de sensibilização compreende-se que existe uma mudança no grau sob uma perspectiva metalúrgica e mais análises sobre este fenômeno faltam atualmente para as ligas de Al-Mg, onde se destaca uma lacuna de conhecimento entre a corrosão intergranular e a microestrutura da liga (ZHANG, ZHANG, YAN, THOMAS, DAVIE, BIRBILIS, 2017).

2.12 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA AA5083

A liga 5083 é uma liga não tratável termicamente como teor de magnésio em torno de 4,5% além de 0,15% de cromo e 0,7% de manganês e é normalmente disponível em placas laminadas por uma série de usinas produtoras. Como todas as ligas com alto teor de magnésio da série 5000, a AA5083 alcança alta resistência por meio do trabalho a frio, permitindo uma

série de temperas “H”, esta liga é a que possui uma das maiores resistências dentre as outras ligas e é a mais conhecida na utilização de placas para a construção de navios. A liga também pode ser utilizada para a produção por extrusão como tubo sem costura dentre outras extrusões e também produtos forjados.

Um ponto fraco da liga em questão é com relação à usinagem, devido a sua alta dureza ela possui uma usinabilidade baixa. A Figura 13 mostra a composição da liga:

Figura 14 - Especificação de Composição Química AA5083, em % por peso

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Outros
0,20	0,35	0,15	0,20 – 0,50	4,0 – 5,0	0,10	—	0,25	0,10	0,15

Fonte: Aluminum Association, 2015

2.12.1 Resistências à Corrosão

A AA5083 é excelente em um amplo range de ambientes, como no processamento de alimentos e até em aplicações arquitetônicas, contudo a principal aplicação para a liga é em ambientes marinhos. Neste caso o teor de magnésio é superior a 3,5% Mg, então esta liga pode ser suscetível a corrosão, o que limita sua aplicação temperatura abaixo de 65°C e a quantidade de trabalho a frio. Testes especiais de corrosão intergranular e esfoliação são realizados para certificar que esta liga 5083 esteja apta a atender as aplicações marítimas.

2.12.2 Tratamento Térmico

A liga em questão não é endurecível por tratamento de calor, sendo assim pode ser significativamente endurecida por trabalho a frio, por exemplo, por laminação a frio e também várias temperas "H" são produzidos é mais comum a H32 que possui cerca de um quarto de dureza ou a resistência semelhante à utilizada em metais marinhos como as temperas H116 e H321.

Após o trabalho a frio a liga espontaneamente reduz sua dureza por envelhecimento à temperatura ambiente, contudo atingirá uma condição estável, sabendo que todos os produtos planos laminados são fornecidos com as propriedades estáveis. Isso geralmente é alcançado por um tratamento térmico de estabilização como a última operação que resulta nas temperas H32 ou H321, a H112 é endurecida novamente por tensão na operação final para alcançar com maior rapidez as propriedades estáveis necessárias da tempera.

Para suavizar a liga 5083, pode-se recozera um aquecimento na temperatura de 345°C, mantendo até uniformizar a temperatura e em seguida resfriar, sendo que a taxa de resfriamento não é importante.

2.12.3 Soldagem

A liga AA5083 possui excelente soldabilidade por todos os padrões elétricos e métodos de resistência, é importante destacar que a soldagem a gás não é recomendada sendo que os métodos GMAW e GTAW são os preferidos e amplamente utilizados para produzir soldas estruturais.

Quando se solda a 5083 consigo mesmo ou com outra liga da série 5XXX, o metal de adição recomendado é o AA5183 mesmo existindo outros que também podem ser utilizados. A soldagem das temperas endurecidas por tensão causa a redução da resistência nas zonas afetadas pelo calor.

2.13 CORROSÃO

Os minérios geralmente são encontrados em forma de óxidos dos metais, com algumas exceções, mas na maioria das vezes é necessário o gasto elevado de energia para reduzir o minério em metal puro.

A corrosão pode ter a definição da tendência do metal produzido e trabalhado de reverter ao estado inicial, estado de mais baixa energia livre. Entretanto existe outra definição, aceita e mais conhecida onde a corrosão é definida como sendo a deterioração que acontece quando o material reage com o ambiente em que este está. Seguindo a linha de raciocínio da termodinâmica, a corrosão metálica tem como principal influenciador a tendência de decréscimo de energia. Ou seja, corrosão nada mais é que o resultado de interações químicas e ou físicas entre o metal e o ambiente (RAMANATHAN, 1992).

Ramanathan (1992) define a corrosão metálica como sendo a transformação de um material metálico ou liga metálica, pela sua interação química ou eletroquímica, em um meio de exposição, este processo tem como resultado a formação de produtos de corrosão e a liberação de energia. Geralmente a corrosão do metal por processo eletroquímico, está ligada à exposição deste material a um meio que contem a presença de umidade, junto com o oxigênio e/ou íons de hidrogênio tudo isso em um ambiente condutor (RAMANATHAN, 1992).

Existem diferentes formas de ocorrer à corrosão, estas formas podem ser nomeadas de acordo com a situação em que o metal se apresenta quando corroído, sendo a corrosão uniforme, galvânica e por frestas os tipos mais comuns e fáceis de observar, dependendo do nível da corrosão é possível ser visto a olho nu (RAMANATHAN, 1992).

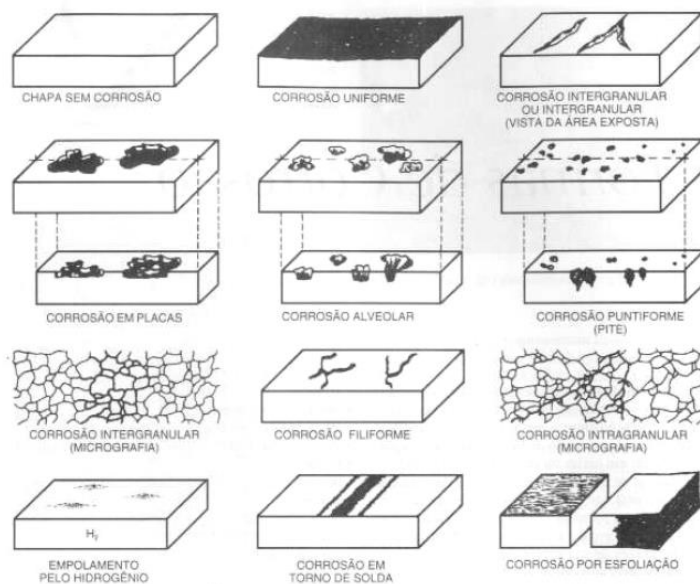
Quando o metal está uniformemente corroído é fácil a detecção porque este é afetado em toda a sua extensão, devido a isso é importante se escolher o metal que menos será atingido pelo ambiente em que este estará exposto, além de muitas vezes ser necessário realizar alguns processos que evitam a corrosão, processos como a pintura ou a galvanização

(RAMANATHAN, 1992).

Outros tipos de corrosões são as por pites, por aeração diferencial, filiforme, além de outras. Existem as formas conhecidas devido à geometria do ataque ocorrido, a aparência da superfície do material deteriorado e ao tipo de desgaste que se obtém pelo tempo, exemplos destes casos são as corrosões por placas, corrosão alveolar, corrosão intercrystalina (também conhecida como corrosão intergranular) e corrosão transcrystalina (BARILE, 1978; FONTANA, 1986).

O oxigênio dissolvido é um dos fatores que mais interferem na corrosão metálica, além da temperatura, o pH do meio e por fim, os sais dissolvidos. Assim como o oxigênio, os sais dissolvidos têm a característica de acelerar a corrosão devido a sua ação despolarizante, que eu processo de eliminação de substâncias que protegem o eletrodo (MERÇON, GUIMARÃES, MAINIER, 2011; CLARKE, 1980). A Figura 15 demonstrada às formas esquemáticas de corrosão:

Figura 15 - Formas esquemáticas de corrosão



Fonte: Gentil, 2003

2.13.1 Corrosão Uniforme

O termo "corrosão uniforme" se refere ao tipo de corrosão que se processa por toda a extensão superficial do metal, ocasionando perda uniforme da espessura. É também conhecida como "corrosão generalizada" conforme apresenta a Figura 16 (GENTIL, 2003).

Figura 16 – Corrosão uniforme



Fonte: Gentil, 2003

2.13.2 Corrosão por Pite

O pite se desenvolve em pontos ou em pequenas regiões localizadas na superfície metálica, a corrosão é em forma de cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e com sua profundidade normalmente menor que o seu diâmetro como mostra a Figura 17 (GENTIL, 2003). Dependendo da espessura do metal utilizada na aplicação a quantidade de pite pode ser tolerada.

Para que se desenvolva um pite um eletrólito deve estar presente, este pode ser um volume de um líquido, um sólido úmido, uma condensação de umidade, gotículas de água sobre a superfície do alumínio ou imersão em uma solução agressiva e também o oxigênio tem que estar presente. No caso do alumínio, início do pite acontece quando rompe a camada protetora da superfície em determinados pontos, esse rompimento pode ser causado, por exemplo, por agentes agressivos ou pelo contato com metais que possuem diferentes potenciais (GENTIL, 2003).

Figura 17 – Corrosão por pite



Fonte: Gentil, 2003

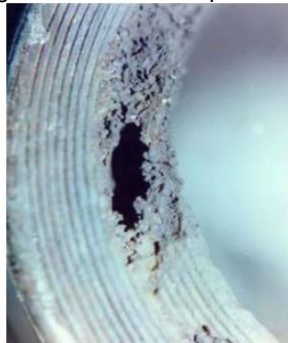
2.13.3 Corrosão por Frestas

Esta corrosão acontece quando duas superfícies de alumínio estão sobrepostas ou alumínio e outro material não metálico formam uma fresta e a região permite a estagnação de um eletrólito junto com resíduos agressivos então ocorrerá a formação de pites de corrosão. Com isso se a boca da fresta estiver submersa ou de algum modo exposta ao ar, onde o oxigênio é mais abundante cria-se uma condição local de água com oxigênio versus água sem oxigênio, chamada de célula de aeração diferencial. No caso de águas doces a corrosão em fresta é baixíssima e em água marítima, a corrosão em fresta segue um caminho na forma de

pite, contudo a resistência à corrosão por fresta em água salgada é tratada de forma paralela com a resistência à corrosão por pite, onde ligas de Al-Mg são mais resistentes que ligas de Al-Mg-Si (GENTIL, 2003).

A corrosão por frestas normalmente ocorre em ambientes restritos como depósitos superficiais, películas de tinta descoladas, materiais de isolamento, rebites, entre outros. Um exemplo desta corrosão está demonstrado na Figura 18.

Figura 18 – Corrosão por frestas



Fonte: Gentil, 2003

2.13.4 Corrosão Galvânica

Esta corrosão é quando o alumínio se encontra em contato com um metal que possui diferente potencial elétrico, por exemplo, o ferro ou cobre e caso este fenômeno esteja na presença de umidade tende, preferencialmente, a corroer o alumínio (GENTIL, 1996).

De um modo geral a corrosão acontece devido à união elétrica de dois materiais, sejam eles metais ou ligas, e ao mesmo tempo esta união está exposta a um eletrólito. Neste caso o metal mais reativo, observando o ambiente em que estejam expostos irá corroer enquanto o metal mais inerte, ou seja, que possui menos tendência de reagir, que faz o papel de cátodo, será protegido de sofrer a corrosão (CALLISTER, 2008).

A taxa de corrosão depende de fatores como a diferença de potencial elétrico dos metais, da resistência elétrica, da condutividade do eletrólito a que estão expostos, a área total do cátodo/ânodo e das características de polarização dos dois metais. Estes fatores podem variar com grande escala de agressividade. A corrosão galvânica pode acontecer também se os metais mesmo separados estiverem expostos a um mesmo eletrólito, sendo assim unidos por uma conexão elétrica externa (GENTIL, 1996).

A maneira de combater esse efeito corrosivo é utilizando materiais isolantes como a borracha, também por meio de camadas protetoras como tintas, plásticos, etc., dentre outros. Para instrumentais cirúrgicos, é recomendado o uso de papel de grau cirúrgico ou campo de tecido de algodão cru duplo. Outra forma é a remoção do meio eletrolítico, sobretudo quando de natureza incidental, como por exemplo, água de chuva ou de condensação, o acúmulo de

agentes corrosivos sejam eles os bactericidas ou detergentes usados na esterilização. Na Figura 19 um exemplo:

Figura 19 – Corrosão galvânica



Fonte: Gentil, 2003

2.13.5 Corrosão sob Tensão

Esta corrosão é caracterizada pela a solicitação de esforços em um determinado material na presença de um meio corrosivo, sendo que, nestas condições de trabalho, os esforços realizados são menores em relação aos ensaios normais, para que haja a fratura do material (GENTIL, 1996).

Uma importante observação sobre a corrosão sob tensão é que não se observa praticamente perda de massa do metal até sua fratura e o tempo de corrosão do material depende de alguns fatores como a tensão, a concentração ou natureza do meio corrosivo, a temperatura e a estrutura da composição do material.

2.13.6 Corrosão Microbiológica

A corrosão microbiológica ou microbiana é um tipo de corrosão causada por micro-organismos que atuam de maneira intensa nos processos corrosivos. Estes estão em toda parte e podem ser encontrados em uma vasta gama de equilíbrio ácido, abrangendo uma existência em temperaturas de -5°C até 110°C , e são um dos maiores responsáveis pela corrosão em tubulações industriais enterradas. Geralmente, os micro-organismos são uma fonte geradora de produtos que, dependendo do meio em que se encontram, poderão iniciar um processo de corrosão química ou eletroquímica (SARTORI, 2009).

A maioria desses micro-organismos vive naturalmente na área metálica, aderidos a uma superfície de substratos, que são gerados por série complexa de eventos sofridos pelas superfícies metálicas, tais como a excreção de exopolímeros pelos próprios microrganismos, que se ligam fortemente ao substrato, formando uma espécie de biofilme, também conhecido como biofouling, que torna favorável a proliferação desses micro-organismos responsáveis

pela corrosão (GENTIL, 1996).

Existem vários tipos de microrganismos corrosivos, e dependendo do tipo, o mecanismo de corrosão é diferente, havendo uma divisão sobre os tipos de mecanismos desta corrosão, esses são dados como corrosão por excreção de ácidos, formação de solventes orgânicos, compostos metabólicos, formação de biofilme, corrosão em vivo (corpo humano).

2.13.7 Esfoliação

Processa-se de forma paralela à superfície metálica. Frequentes em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados, criando condições para que inclusões ou segregações, presentes no material, sejam transformadas devido ao trabalho mecânico, em plaquetas alongadas (GENTIL, 1996).

2.13.8 Filiforme

Na forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se ultrapassam, pois se admite que o produto de corrosão, em estado coloidal, apresenta carga positiva, daí a repulsão. Ocorre geralmente em superfícies metálicas revestidas com tintas ou metais. E é observada com mais frequência em revestimentos mais permeáveis à penetração de oxigênio e água, ou ainda apresentando falhas e riscos.

Acredita-se que a corrosão filiforme tenha um mecanismo semelhante à corrosão em frestas, devido à aeração diferencial provocada por defeito no filme de pintura, embora o mecanismo real não seja ainda bem conhecido. De modo geral o processo corrosivo começa nas bordas, progride unifilarmente apresentando a interessante característica de refletir com o mesmo ângulo de incidência em obstáculos (SARTORI 2009).

Costuma ocorrer em frestas de superfícies esmaltadas ou envernizadas, expostas à atmosfera. É observada em aço, Zn, Al ou Mg, recobertos. Não provoca danos mecânicos, metalurgicamente dito, não afeta a estrutura do material. Os filamentos gerados tendem a seguir o polimento sendo o exemplo mais comum o ataque às latas de alimento envernizadas, expostas à atmosfera.

2.13.9 Corrosão Intergranular

Corrosão intercrystalina ou intergranular é um tipo de corrosão que normalmente se localiza longo dos contornos de grão, esse processo acontece com maior frequência em ligas de aço inoxidável, alumínio e cobre. Nesses casos o processo corrosivo está relacionado a

uma microestrutura sob o processo de sensitização (ANTUNES, COSTA, TERADA, PADILHA, 2007).

O processo de corrosão intergranular possui cinco principais teorias para tentar explicá-lo sendo eles: A corrosão intergranular tem início após o empobrecimento das localidades adjacentes aos contornos de grãos em elementos que tem como responsabilidade a resistência à corrosão; A segunda teoria é que se forma constituintes microestruturais, que podem ser removidos de forma seletiva em determinados meios e soluções; Como a terceira teoria se tem o enriquecimento do contorno de grão em materiais que facilitam a dissolução anódica, gerando um ponto de corrosão localizada que se oriente com preferência pelos contornos de grão. A quarta teoria é quanto às tensões de coerência nas vizinhanças dos contornos de grão, causando uma área com maior susceptibilidade ao processo corrosivo; Por fim, a quinta teoria se refere à formação localizada de células onde o carboneto (no caso do aço), com composição química mais estável que a matriz adjacente, funciona como catodo desta forma, esta micro pilha galvânica causa uma região mais susceptível a corrosão devido à criação de um micro par galvânico (ANTUNES, COSTA, TERADA, PADILHA, 2007).

Então como o nome sugere a corrosão intragranular, “intra = dentro” é a que ocorre dentro dos cristais do material metálico. Ela acontece através da perda de propriedades mecânicas, podendo causar fraturas no material a qualquer momento, caso este seja submetido a qualquer tipo de esforço mecânico (GENTIL, 2011).

Existem situações que tornam a região de um contorno de grão muito reativa, causando este tipo de corrosão que se refere a uma desintegração da liga. A presença de impurezas pode facilitar o processo corrosivo.

O mecanismo de corrosão intergranular no alumínio é eletroquímico que é resultado da ação de uma célula local no contorno de grão. Estas células são formadas entre os microconstituintes de segunda fase e a zona que está empobrecida na solução sólida, ou seja, a corrosão intergranular ocorre na existência de um caminho preferencial na região dos contornos de grão, fazendo com que os grãos sejam destacados à medida que a corrosão se alastra (HATCH, 1984).

O grau de susceptibilidade a corrosão varia de acordo com a forma em que o precipitado está no material, além do teor de magnésio e do tempo de exposição a altas temperaturas por longos períodos.

Como dito anteriormente as ligas de alumínio-magnésio contendo acima de 3% de magnésio, podem formar precipitados de Al_3Mg_2 em rede contínua nos contornos de grão. Com isso estes precipitados são corroídos porque são menos resistentes à corrosão do que a matriz. Sabendo que em algumas ligas de alumínio ocorre o precipitado em rede contínua, e em outras não, por exemplo, $MnAl_6$ ou Mg_2Si , onde estes não são susceptíveis a corrosão intergranular pois, devido a esses precipitados terem o mesmo potencial da matriz. Na mesma

classe está à liga Al-Mg que contém menos de 3% de Mg.

2.13.9.1 Corrosão Intergranular do Alumínio

A liga AA5083 apesar de ser conhecida pela excelente resistência a corrosão, pode se tornar susceptível ao ataque corrosivo intergranular e ao ataque corrosivo sob-tensão quando exposta por um longo tempo a temperaturas que variam de 50°C e 200°C. Isso ocorre devido à sensitização, que está relacionada com a dissolução seletiva da fase Beta (Mg_2Al_3), a qual precipita em rede contínua no contorno de grão (SEARLES, GOUMA, 2001).

A susceptibilidade à corrosão intergranular aumenta conforme cresce o teor de magnésio, tempo de exposição à temperatura favorável a este fenômeno e a quantidade de trabalho a frio. As ligas da série (5XXX) que possuem menos que 3% de magnésio são altamente resistentes à corrosão intergranular. Entretanto, as ligas com quantidade acima de 3% de magnésio podem apresentar baixa resistência a este tipo de corrosão, sendo que existe a possibilidade de se formarem precipitados da fase beta Mg_2Al_3 em rede contínua no contorno de grão. Então, a susceptibilidade da liga está relacionada com a maneira com que este precipitado se encontra no material, sabendo que este é anódico em relação à matriz, ou seja, oxida preferencialmente (HATCH, 1984).

O ambiente corrosivo, por exemplo, um ácido ataca preferencialmente o intermetálico de segunda fase. Como a fase β está precipitada em rede contínua no contorno de grão é anódica em relação à matriz de alumínio, então acontece a corrosão durante o teste. Quando ocorre este efeito é possível afirmar que o material é pouco resistente à corrosão intergranular, apresentando assim, uma perda considerável de massa por unidade de área (GODARD, JEPSON, BOTHWEL, 1967).

Em ligas que ocorre a precipitação do Mg_5Al_8 em rede contínua no contorno de grão a taxa de corrosão intergranular também acontece e sofre um aumento quando o material é colocado em um meio que contém cloretos como, por exemplo, meios ácidos, água do mar e atmosferas marítimas.

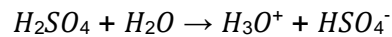
Com isso, o estudo metalúrgico é imprescindível para determinar a resistência à corrosão intergranular, ou seja, se durante este processo o precipitado Mg_5Al_8 acontecer à precipitação de forma aleatória na matriz de alumínio o material apresentará boa resistência (DAVIS, 1999).

Uma grande parte dos metais sofre reações com o ácido sulfúrico, em reação de um simples deslocamento, onde ocorre a formação de hidrogênio gasoso e sulfato de metal em reação. O ácido sulfúrico quando diluído em água ataca o alumínio com esta reação, além do ferro, do manganês, do níquel e o do zinco. Em relação ao cobre e estanho, necessita-se que

o ácido concentrado seja aquecido. São inertes ao ácido sulfúrico o chumbo e o tungstênio (ABRACO, 2015).

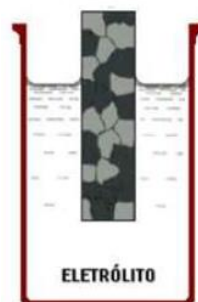
A reação que acontece entre o óxido de alumínio e o ácido sulfúrico, forma o sulfato de alumínio, e segue a seguinte reação: $Al_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + 3H_2O$. Este tipo de reação causa a destruição da camada de óxido do alumínio e impede sua repassivação. Na proporção de 60% de H_2SO_4 e 40% de H_2O , o ácido sulfúrico encontra a proporção ideal de hidrogênio e oxigênio para gerar o fenômeno da dissociação. Este fenômeno é uma característica dos ácidos fortes, que se dissolve na água, se dissocia com o estabelecimento de um equilíbrio reversível entre as substâncias não dissociadas e seus íons (ABRACO, 2015).

O ácido sulfúrico em água se comporta como um ácido forte em sua primeira dissolução, onde apresenta uma reação extremamente exotérmica de hidratação. Tal reação acontece com a formação na mistura de íons hidrônio, pela seguinte reação:



Ao acontecer esta reação, forma-se um eletrólito carregado com íons de H_3O^+ e HSO_4^- com condições ideais para ocasionar um ataque ao alumínio conhecido como “Pilha de ação local”, com eletrólito carregado com partículas de íons causadores da corrosão como mostra a Figura 20. Estas pilhas são provavelmente mais frequentes na natureza, elas aparecem em um mesmo metal devido a heterogeneidades diversas, decorrentes da decomposição química, textura do material, tensões internas ou segregados. Neste caso específico, a principal causa são as segregações em contorno de grão das partículas da fase β (Mg_5Al_8) em contorno de grão. Estes precipitados são corroídos porque sofrem a corrosão porque são menos resistentes do que a matriz, por diferença de potencial (ABRACO, 2015).

Figura 20 - Pilha de ação local
AA5083



Fonte: Abraco, 2015

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão descritos os materiais que foram necessários e os métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

3.1 MATERIAIS

Foi utilizada uma chapa de alumínio da liga AA5083 laminada a quente, a especificação do material segue as normas da Aluminum Association para a fabricação, por exemplo, de tanque de transportes. Desta chapa foram retirados três corpos de prova.

Para a preparação das 3 amostras sendo 2 sensitizadas e uma em estado inicial, foram utilizados os corpos de provas, sendo um para cada amostra. Além de serem utilizados os equipamentos dispostos no laboratório de metalografia da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, equipamentos como: Lixa de carbetto de silício com granas de 220, 400, 600, 1200 e 2000; Álcool isopropílico; Pasta de diamante 4,0 μm ; Sílica coloidal; Ácido fosfórico (H_3PO_4); Ácido nítrico (HNO_3); Microscópio ótico;

Foram utilizados outros materiais como balança, forno, béqueres, entre outros normalmente utilizados em laboratórios químicos e metalográficos.

3.2 MÉTODOS

Foram confeccionadas 3 amostras nas dimensões 14 mm de comprimento e 4 mm de largura. Cada corpo de prova foi pesado inicialmente com a finalidade de ser comparado ao final do processo de corrosão. A Figura 21 indica o peso inicial das amostras respectivamente o da inicial, tratada termicamente a 170°C e 240°C.

Figura 21 – Peso inicial das amostras



Fonte: os autores.

A Tabela1 representa a tabela com os valores dos pesos iniciais.

Tabela 1 – Valores do peso das amostras

Amostra	Inicial	170°C	240°C
Peso Inicial (g)	16,627	16,307	17,116

Fonte: os autores.

Para realizar o tratamento térmico foram separadas as 2 amostras as quais sofreriam o tratamento térmico, que foi realizado em um forno tipo mufla. Uma amostra foi exposta a temperatura de 170°C primeiramente, e a outra foi exposta a 240°C em seguida, o tempo de ambos os procedimentos ocorreram por 168 horas ininterruptas. A terceira amostra foi mantida em seu estado de fabricação afim de ser a base para evidenciar as mudanças das amostras tratadas termicamente. Um exemplo do forno utilizado está demonstrado na Figura 22.

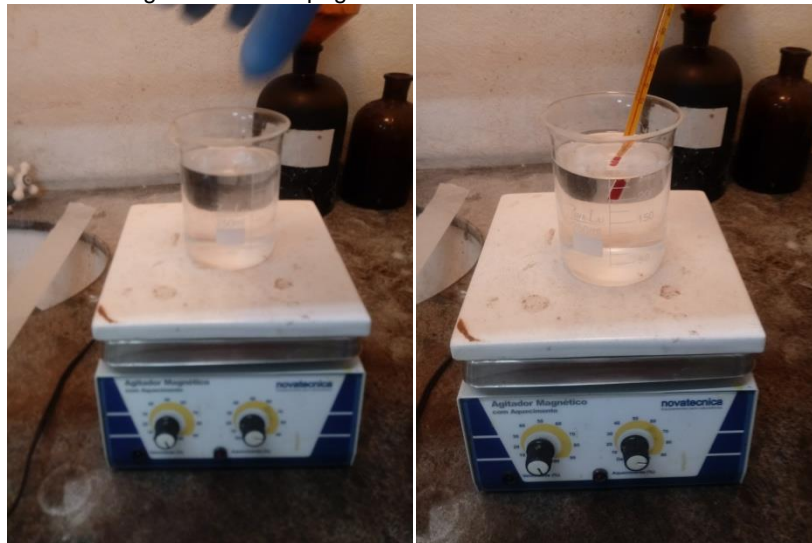
Figura 22–Forno mufla



Fonte: Jung, 2018

Após as amostras serem retiradas do forno e resfriadas lentamente na temperatura ambiente, então as 3 amostras foram encaminhadas para o laboratório químico da faculdade para sofrerem o processo de decapagem feita em hidróxido de sódio 5% a 70°C pelo período de um minuto e também em ácido clorídrico concentrado também por apenas um minuto. A Figura 23 e a Figura 24 demonstram a decapagem em hidróxido de sódio e ácido clorídrico respectivamente.

Figura 23 – Decapagem em hidróxido de sódio a 70°C



Fonte: Os autores, 2018

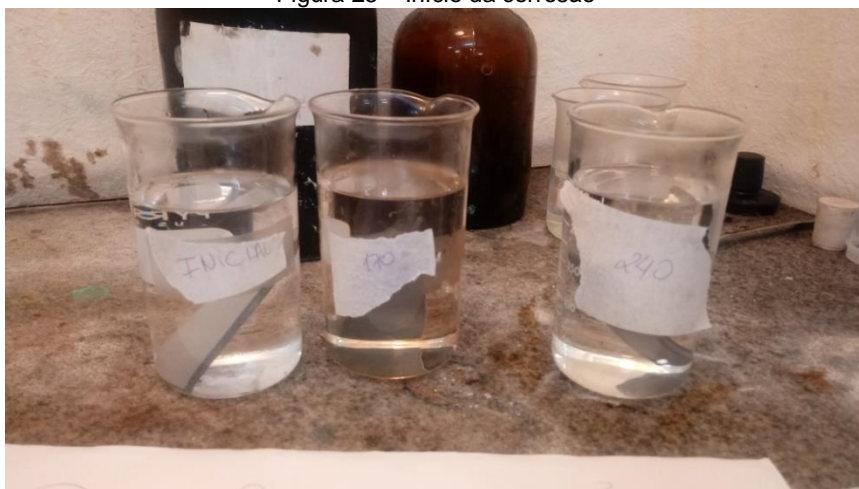
Figura 24 – Decapagem em ácido clorídrico



Fonte: Os autores, 2018

Após a decapagem, as amostras foram novamente pesadas e depois mergulhadas por completo em ácido nítrico com concentração de 60% diluído em álcool para serem expostas ao ambiente do teste de corrosão pela duração de 24 horas. A Figura 25 mostra o momento em que o teste de corrosão foi iniciado com as amostras nos béqueres.

Figura 25 – Início da corrosão



Fonte: Os autores, 2018

O teste corrosivo em ácido nítrico com 60% de concentração, por 24 horas foi realizado seguindo a norma ASTM G67. Como a Figura 26 mostra, utilizou-se 3 béqueres, com 300 ml de ácido nítrico onde a solução (ácido nítrico e álcool) variou de 10 a 100%, calculados em cima da concentração inicial do ácido. Em um recipiente foi colocado uma amostra sensibilizada e em outro a não sensibilizada.

Após o período de teste, as amostras foram retiradas da solução e imediatamente lavadas com água corrente. Para esta nova etapa, utilizou-se uma escova de cerdas macias e definido um padrão de escovação (cerca de 20 escovadas), para todas as amostras, afim de, realizar igualmente a remoção do óxido de alumínio liberado durante o teste.

Posteriormente os corpos de prova foram novamente pesados e identificados.

A etapa seguinte foi composta pelos procedimentos metalográficos, onde as amostras foram cortadas, conforme as dimensões apropriadas para o processo de embutimento, e preparados corpos de prova para análise da microestrutura, um corpo de prova não sensibilizado e 2 amostras sensibilizadas a 170°C e 240°C.

O embutimento foi realizado nos corpos de prova com o objetivo de mantê-los fixos e firmes em uma superfície consistente de maneira que facilitasse os demais procedimentos metalográficos, como lixamento, polimento e análise. O metal é colocado na embutidora com um material em pó que ao ser aquecido e pressionado cria um revestimento em torno do metal conforme a Figura 26.

Figura 26 – Início da corrosão



Fonte: Os autores, 2018

Após o embutimento, foi feito o lixamento de todas as amostras. Nesta etapa as peças embutidas foram submetidas à lixamentos gradativos em lixas d'água retangulares, a granulometria seguiu respectivamente os valores de 180, 240, 320, 480, 600, 1000, 1200, 1500 e 2000. O processo de lixamento é feito até que os riscos e defeitos superficiais da amostra sejam retirados e a superfície esteja limpa e plana.

O polimento das peças embutidas foi realizado em uma politriz circular, que possuía um pano para polimento, além da pasta de diamante e da sílica coloidal como agente polidor. A técnica de polimento utilizada foi a de contra rotação, este trabalho foi realizado até que a amostra estivesse livre de risco ou mancha.

Para limpar as amostras antes do ataque químico foi utilizado água corrente, detergente e álcool isopropílico sendo que para secar foi usado um secador de cabelo convencional e algodão.

Para conseguir revelar a microestrutura final do material, as amostras foram submetidas ao ataque químico pelo método de imersão, onde a peça fica completamente coberta pela solução, o agente utilizado foi o ácido fosfórico (H_3PO_4), com 40% de concentração, durante três minutos na temperatura de 40° C e em constante agitação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a conclusão da limpeza e estabilização do peso das amostras, foi executada a metalografia final das amostras, os resultados obtidos foram expostos e analisados. Após a pesagem obteve-se o resultado de perda de massa que pode ser analisado na Tabela 2 onde são indicados os pesos iniciais, os pesos após a corrosão e a perda de massa das amostras.

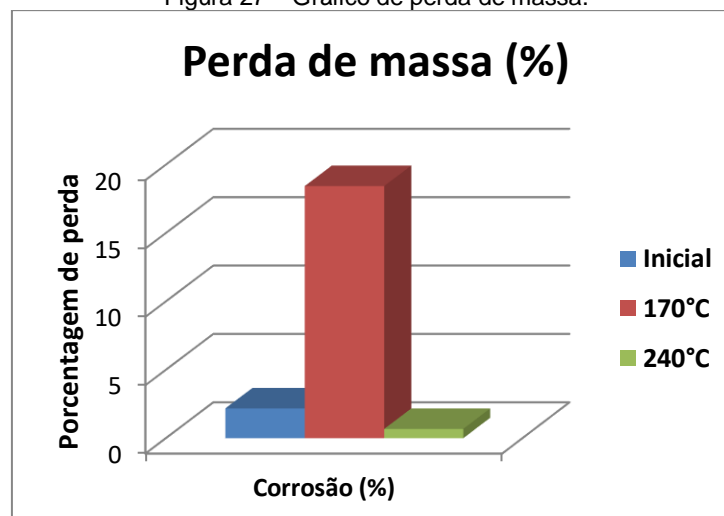
Tabela 2 – Comparação dos pesos

Amostra	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Corrosão (%)
Inicial	16,627	16,264	2,18
170°C	16,307	13,300	18,44
240°C	17,116	17,000	0,68

Fonte: Os autores, 2018

Ficou evidente a perda considerável de massa da amostra sensibilizada a 170°C, levando em consideração a proporção da perda relação ao tamanho da amostra. A Figura 27 representa o gráfico da perda de massa das amostras.

Figura 27 – Gráfico de perda de massa.



Fonte: Os autores, 2018

Nota-se que houve maior perda de massa na amostra sensibilizada a 170°C, isso ocorreu devido ao mecanismo de corrosão intergranular causado pelo tratamento de sensibilização que resultou na precipitação da fase β (Mg_2Al_3) em rede contínua no contorno de grão.

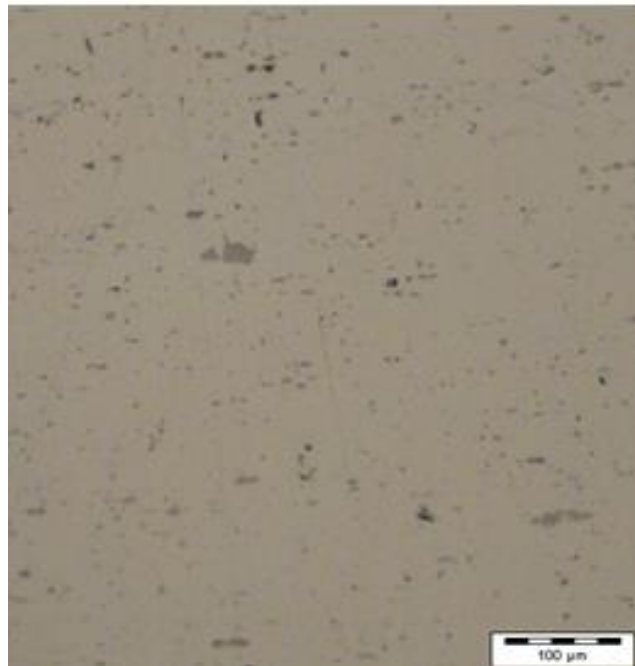
Na presença de um eletrólito (ácido nítrico), a matriz do material se torna catódica em relação à fase precipitada, levando assim a geração de uma pilha que ocasiona o início do processo de corrosão intergranular.

Levando em consideração a ausência deste mecanismo, as amostras não sensibilizadas quase não perderam massa, pois a fase β permanece como solução sólida no interior do grão e não precipitada em rede contínua no contorno, apresentando assim somente a corrosão devido ao ataque corrosivo em ácido nítrico com 60% de concentração, por 24 horas.

Após ser feita a tabela e o gráfico da proporção da perda de massa, o próximo passo tomado foi a metalografia do material, e para análise foram tiradas fotografias das microestruturas das amostras, antes e após o ataque químico, a fim de revelar a estrutura interna do metal com apenas o polimento e também depois do ataque, revelando a fase β (Mg_2Al_3) em solução sólida nas amostras não sensibilizadas e precipitada em rede contínua no contorno de grão nas amostras sensibilizadas.

As micrografias foram obtidas através de microscopia ótica com aumento de 100x e 500x para todas as amostras. Com as imagens obtidas, é possível observar que a microestrutura da liga AA5083, tem a fase clara (Al, Fe, Mn) e a fase escura composta de Mg_2Si , conforme ilustra a Figura 28:

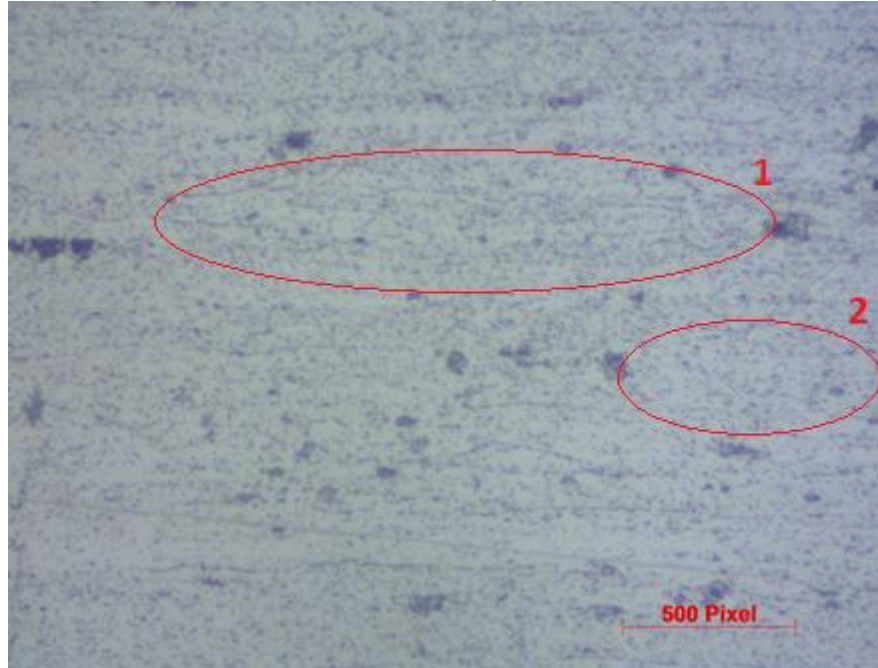
Figura 28 – Amostra inicial como polida.



Fonte: Os autores, 2018

Na Figura 29 a amostra em estado inicial possui uma região demarcada como “1”, essa região apresenta uma localizada precipitação da fase β em rede contínua no contorno de grão e na região “2” apresenta-se a precipitação no interior do grão, isto é dado pelo processo inicial de fabricação da amostra.

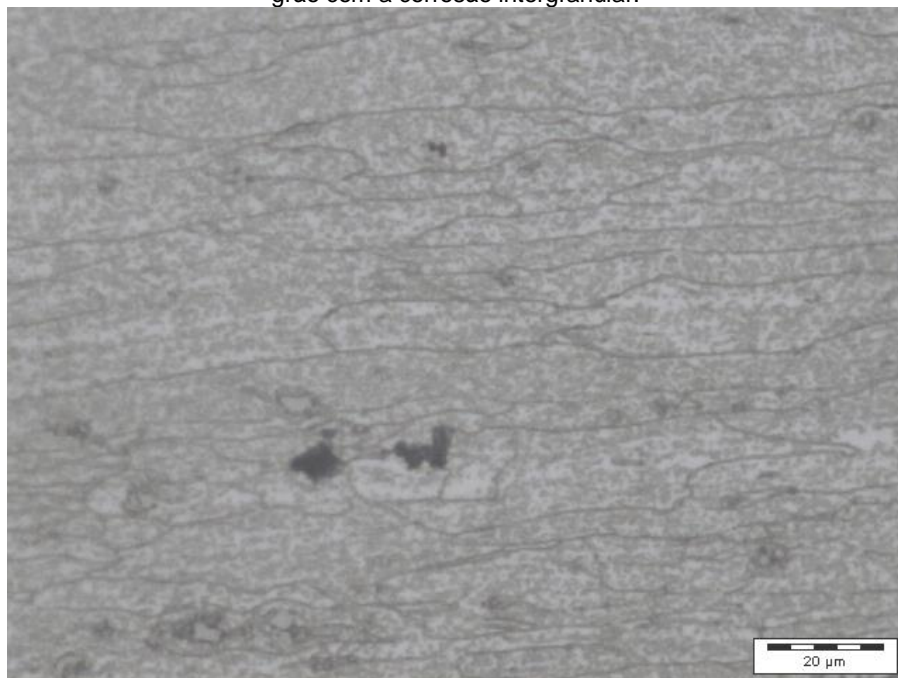
Figura 29 – Amostra em estado inicial possui precipitados da fase β no interior do grão e em rede contínua no contorno de grão.



Fonte: Os autores, 2018

Como apresentado na Figura 30 após o ataque químico, a amostra tratada a 170°C apresenta a fase β precipitada em rede contínua no contorno de grão, tornando esse material susceptível a corrosão intergranular. Como já dito, devido a este fenômeno esta amostra sofreu maior corrosão e perda de massa.

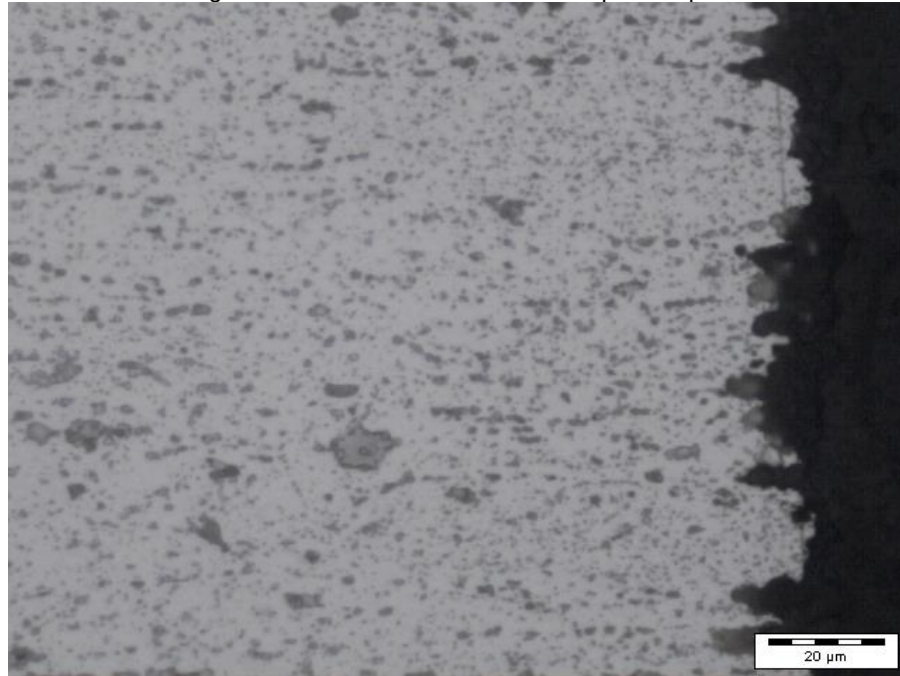
Figura 30 – Amostra sensibilizada a 170°C após ataque. Precipitados da fase β em rede contínua no contorno de grão com a corrosão intergranular.



Fonte: Os autores, 2018

A amostra tratada termicamente a 240°C não apresentou a sensitização, porém, se revela precipitados da fase β no interior do grão do metal. Esse fato ocorreu porque a sensitização acontece em temperaturas no range de 60°C a 200°C. Como pode ser analisado na Figura 31 houve corrosão apenas nas bordas da amostra.

Figura 31 – Amostra tratada a 240°C após ataque.

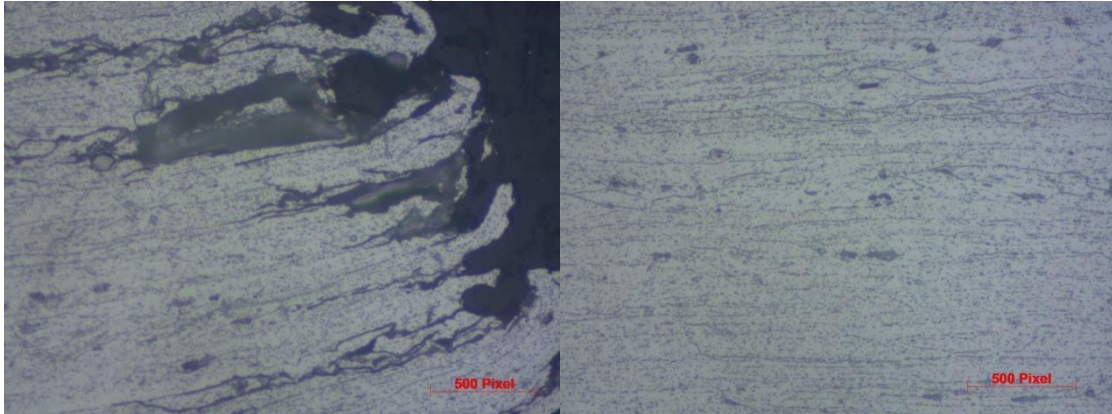


Fonte: Os autores, 2018

Notam-se diferentes tipos de corrosão nas amostras, o material com a microestrutura inicial, ou seja, sem tratamento térmico apresenta corrosão uniforme ao longo do seu corpo e localizada corrosão intergranular, a amostra tratada a 170°C apresenta corrosão intergranular por toda a sua extensão e corrosão por esfoliação em suas bordas devido à precipitação da fase β em rede contínua no contorno do grão e por fim, o material tratado a 240°C, devido a sua precipitação no interior do grão apresentou baixa corrosão localizada (pite), e por esta razão a baixa perda de massa do material.

A Figura 32 apresenta a microestrutura da amostra inicial após o ataque, podem-se analisar os precipitados da fase β no interior do grão ocasionando uma corrosão uniforme, além de precipitados no contorno do grão causando também um pouco de corrosão intergranular.

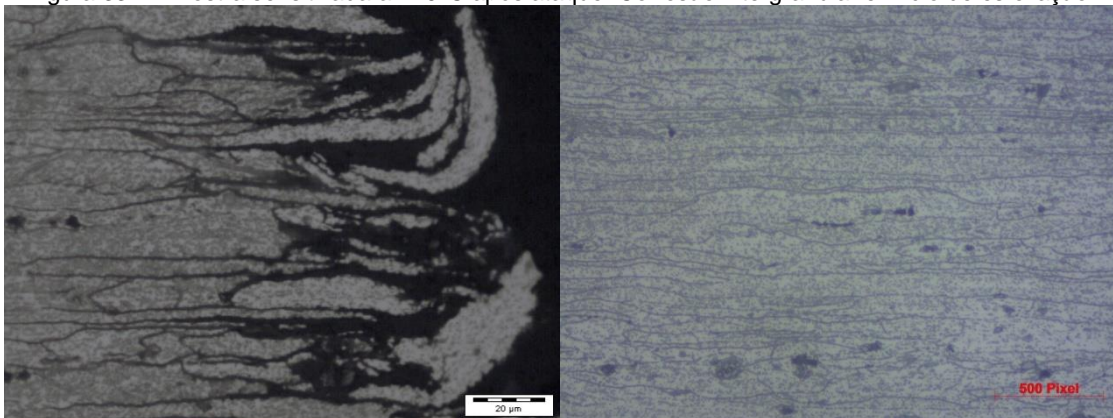
Figura 32 – Amostra como inicial após ataque. Precipitados da fase β no interior do grão e princípio de corrosão intergranular e corrosão uniforme.



Fonte: Os autores, 2018

De acordo com a Figura 33 as bordas laterais, da amostra sensibilizada, sofreram corrosão por esfoliação ocasionada pelos seus grãos alongados. Além da alta corrosão intergranular.

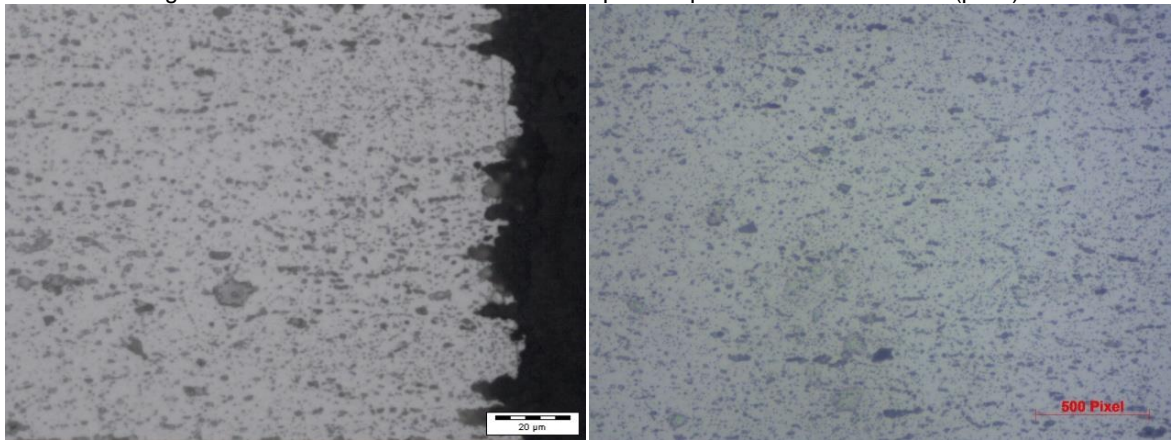
Figura 33 – Amostra sensibilizada a 170°C após ataque. Corrosão intergranular e início de esfoliação.



Fonte: Os autores, 2018

A Figura 34 apresenta a microestrutura da amostra tratada termicamente a 240°C, nesta imagem observa-se a precipitação da fase β no interior do grão, o que ocasionou a corrosão localizada conhecida como pite.

Figura 34 – Amostra sensibilizada a 240°C após ataque. Corrosão localizada (pites).



Fonte: Os autores, 2018

5. CONCLUSÃO

Com o objetivo de analisar o mecanismo de corrosão da liga de alumínio AA5083 (Al-Mg), submeteram-se as amostras da liga AA5083 a temperaturas elevadas, em temperaturas de 170°C e 240°C, por um tempo prolongado de 168 horas (caso estudado), a fim de avaliar a precipitação de sua fase β em rede contínua de contorno de grão.

Como resultado foi obtido que a amostra em estado inicial (sem tratamento térmico) apresentou 2 regiões com as microestruturas distintas devido ao seu processo de fabricação. A mesma apresenta a fase β Mg_2Al_3 parte em rede contínua no contorno de grão e junto a isto, parte precipitada no interior do grão. Na amostra tratada a 170°C evidenciou-se corrosão intergranular, em consequência da precipitação da fase β Mg_2Al_3 em rede contínua no contorno de grão. A amostra tratada a 240°C apresentou a precipitação da fase β no interior do grão, ocasionando assim a corrosão localizada e baixa perda de massa.

Como já constatado na literatura, o ácido nítrico nas concentrações de 30% a 70% causa maior efeito de corrosão para a liga sensibilizada, com isso compromete suas aplicações.

O trabalho realizado fez uma comparação entre as amostras da mesma liga, com e sem o tratamento de sensibilização, e foi comprovado que esta liga em condição inicial mantém seus microconstituintes sem alterações, em consequência disso, se torna mais resistente ao ácido em comparação as amostras sensibilizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Guia Técnico do Alumínio**. vol.7. São Paulo: ABAL, 2003.
- ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Alumínio e suas ligas**. Coletânea de Normas Técnicas. ABAL. São Paulo, 2008.
- ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Consumo de alumínio cresceu 1,8% no 1º trimestre de 2017**. Informativo. ABAL. São Paulo, 2017.
- ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **História do Alumínio**. Informativo. ABAL. São Paulo, 2018.
- ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Características químicas e físicas**. Informativo. ABAL. São Paulo, 2018.
- ABAL. **Cadeia Primária**. Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. (2018). Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>>. Acesso em 05/08/2018.
- ABAL. **Laminação**. Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. (2018). Disponível em <<http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/laminacao/>>. Acesso em 07/08/2018.
- ABAL. **Reciclagem no Brasil**. Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. (2018). Disponível em <<http://abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/reciclagem-no-brasil/>>. Acesso em 15/09/2018.
- ABRACO. Associação Brasileira de corrosão. **Corrosão – Uma abordagem geral**. Informativo. ABRACO. Rio de Janeiro, 2018.
- ALCAN. **Manual de Soldagem: Alumínio e Suas Ligas**. 1 ed. Alcan Alumínio do Brasil S/A, 1993. 141 p.
- ALTENPOHL, Dietrich G. **Aluminium: Technology, applications, and environment**. 6 ed. Pennsylvania: Philadelphia, 1997. p. 28-30.
- ANTUNES, R. A.; COSTA, I.; TERADA, M.; PADILHA, A. F. **Corrosion resistance of three austenitic stainless steels for biomedical applications**. Materials and Corrosion, Vol. 58, n. 10, 2007.
- AUTONEWS. Automotive News. **Aluminum trend is only growing**. Informativo. Autonews. Detroit, 2018.
- AVEDESIAN, M. M.; BAKER, H. **ASM Specialty Handbook – Magnesium and Magnesium Alloys**. Materials Park. ASM International. Ohio, USA. 1999, p. 314.
- BARILE, N.V. **Princípios de Metalurgia**. In: Curso de Metalurgia. ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S.A., São Paulo: São Paulo, 1978. p.120.
- BENEDYK, J. **Thin strip casting for aluminum sheet applications developed by Pechiney at Neuf-Brisach**. Light Metal Age, v. 59, n. 11-12, 2001.
- BRASILESCOLA. **Ferro fundido cinzento e nodular: propriedades, processos e impactos**

ambientais. Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. (2018). Disponível em <<https://monografias.brasilecola.uol.com.br/engenharia/ferro-fundido-cinzeno-nodular-propriedades-processos-impactos.htm>>. Acesso em 17/08/2018.

CALLISTER, JUNIOR, Willian. **Ciência e Engenharia dos Materiais uma Introdução.** 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.; 2008. p. 705.

CESAR, EDUARDO. **Alumínio afinado: CBA e Poli-USP desenvolvem chapas mais finas e resistentes.** Ed. 98, 2004. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2004/04/01/aluminio-afinado/>>. Acesso em: 13/08/2018.

CLARKE, F. E. **Corrosion and Encrustation in Water Wells: A Field Guide for Assessment.** Prediction and Control. Ed. 34-36. FAO, 1980. p. 95.

COBDEN, Richard. **Aluminum: Physical Properties, Characteristics and Alloys.** Training in Aluminum Application Technologies (TALAT) - Lecture 1501. The Welding Institute, 1991. p. 64.

DAVIS, J. **Microstructures of aluminum alloys.** IN. Aluminum alloys. ASTM specialty handbook. Ohio, 1993.

DEAN, W. A.; HATCH, J. E. **Effects of alloying elements and impurities on properties.** Aluminium: properties and physical metallurgy. 6 ed. Metals Park, Ohio: ASM, 1990.

DUCKER. Ducker Worldwide. **Delivering decades of data-driven decisions.** Informativo. Ducker. Troy, 2018.

EUROPEAN Aluminum Association. **Aluminum Properties.** Informativo. Alueurope. 2015.

FONTANA, Mars. G. Corrosion engineering. 3 ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1986, p. 555.

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 3 ed. LTC. Rio de Janeiro, 1996. p. 39 – 41.

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 4ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 6 ed. LTC. Rio de Janeiro, 2011.

GLEICH Aluminum. **Ficha técnica de produto.** Informativo. Gleich Aluminum. 2015.

GODARD H.P., JEPSON W.B., BOTHWEL M.R., KANE R.L. **The corrosion of light metals** John Wiley & Sons. New York. 1967.

HATCH, J. E. **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy.** ASM. Metals Park Ohio. 1984. p. 424.

KROM, Valdevino, PERES, Bruno L. S.; PIRES, Vanessa A. A. **Reciclagem de latas de alumínio no Brasil.** VIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IV Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. São Paulo: São José dos Campos, 2004. p 4.

LI, Ben Q. **Producing Thin strips by twin-roll casting - Part I: Process aspects and quality issues.** JOM, p. 29-33, 1995.

MERÇON, F.; GUIMARÃES, P. I. C.; MAINIER, F.B. **Sistemas experimentais para estudo de corrosão em metais**. Química Nova na Escola, v. 33, n.1, 2011. p. 57 – 60.

MINATEL, Rogério. **Estudo comparativo sobre a recristalização de chapas de alumínio AA1200 e AA3003 obtidas por lingotamento contínuo (twinrollcaster) e por fundição de placas (directchill)**. Dissertação. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2009.

MUTOMBO, Kalenda; TOIT, Madeleine. **Corrosion fatigue behaviour of aluminium alloy 6061-T651 welded using fully automatic gas metal arc welding and ER5183 filler wire**. International Journal of Fatigue. Disponível em < <https://ro.uow.edu.au/eispapers/3618/>>. Acesso em 21/09/2018.

PEIXOTO, Eduardo. M. A. **Alumínio**. Revista Química Nova na Escola, n. 13, p. 1, 2001.

RAMANATHAN, Lalgudi V. **Corrosão e seu controle**. 1ª ed., São Paulo: Editora Hemus, 1992, 344 p.

RIOS, Paulo R.; PADILHA, Angelo F. **Microstructural path of recrystallization in a commercial Al-Mn-Fe-Si (AA 3004) alloy**. Materials Research. São Carlos, v. 6, n. 4, p. 605, 2003.

RUTTER, Rosemberg O. **Estudo da ocorrência de abertura espontânea da escotilha relacionada à corrosão sob tensão em tampas de alumínio utilizadas em latas para bebidas carbonatadas**. Monografia. Fatec - Pindamonhangaba. São Paulo: Pindamonhangaba, 2011.

SARTORI, A. **Ligas de Alumínio, Características, Classificações e Aplicações**. Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo: Lorena, 2004. p.207

SARTORI, Alexandre, VEIGA, J. Determinação da Susceptibilidade à Corrosão Intergranular para Ligas Al-Mg (5XXX) com mais de 3% de Mg Através da Perda de Massa por Unidade de Área. Dissertação. Novelis do Brasil Ltda. Pindamonhangaba, 2005.

SARTORI, Alexandre. **História do alumínio**. Apostila de Metalurgia dos não ferrosos. FATEC - Pindamonhangaba. Pindamonhangaba, 2009. 18p.

SEARLES, J.L., GOUMA, P.I., BUCHHEIT, R.G. **Stress Corrosion Cracking of Sensitized AA 5083 (Al-4.5Mg-1.0Mn)**, 2001.

ZANGRANDI, Aelcio. **Alumínio e Suas Ligas: Fundamentos Metalurgicos e Tecnologicos**. 1 ed. Lorena: Grafist Editora, 2008.

ZHANG, R.; ZHANG, Y.; YAN, S.; THOMAS, S.; DAVIES, C. H. J.; BIRBILIS, N. **The effect of reversion heat treatment on the degree of sensitisation for aluminium alloy AA5083**. Corrosion Science. Elsevier, 2017. p. 10.