

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**ESTUDO DO MECANISMO DE CORROSÃO  
INTERGRANULAR EM LIGA SOLDADA DE  
ALUMÍNIO AA 5083, EM CONCENTRAÇÃO  
DE 50% DE ÁCIDO CLORÍDRICO.**

**Alan Douglas Silva e Souza  
Peterson Danilo de Oliveira**

**Pindamonhangaba - SP  
2017**

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**ESTUDO DO MECANISMO DE CORROSÃO  
INTERGRANULAR EM LIGA SOLDADA DE  
ALUMÍNIO AA 5083, EM CONCENTRAÇÃO  
DE 50% DE ÁCIDO CLORÍDRICO.**

**Alan Douglas Silva e Souza  
Peterson Danilo de Oliveira**

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

Área de Concentração: Materiais

Orientador: Msc. Alexandre Sartori

**Pindamonhangaba - SP  
2017**

Souza, Alan Douglas Silva; Oliveira, Peterson Danilo

Estudo do mecanismo de corrosão intergranular em liga soldada de alumínio AA 5083, em concentração de 50% de ácido clorídrico / Souza, Alan Douglas Silva; Oliveira, Peterson Danilo / FATEC Pindamonhangaba, 2017. x,55f.: il.; 30 cm.

Orientador Prof. Alexandre Sartori

Co-Orientadora Profª Amir Rivaroli Junior (Graduação) FATEC - Tecnologia de Pindamonhangaba. 2017

1.Liga de alumínio. 2.Corrosão intergranular. 3.Sensitização.  
4.Influência da Soldagem. I. Sartori, Alexandre II. Junior, Amir Rivaroli  
Título.

CDU 620.193

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**ESTUDO DO MECANISMO DE CORROSÃO  
INTERGRANULAR EM LIGA SOLDADA DE  
ALUMÍNIO AA 5083, EM CONCENTRAÇÃO  
DE 50% DE ÁCIDO CLORÍDRICO.**

**Alan Douglas Silva e Souza  
Peterson Danilo de Oliveira**

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

---

Orientador - Prof. Msc. Alexandre Sartori  
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

---

Membro - Prof. Amir Rivaroli Junior  
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

---

Membro - Renato dos Santos Amorim  
Mestre em Engenharia Mecânica - Unitau

**Pindamonhangaba, 14 de Agosto de 2017.**

## DEDICATÓRIA

A Deus nosso pai bondoso, por nos amar e acreditar sempre em nós. Pai criador da nossa vida, que está ao nosso lado em todos os momentos, principalmente nos dias mais difíceis. Seu amor nos transforma e nos renova a cada dia.

## **AGRADECIMENTO**

A Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba por ter cedido toda sua infraestrutura, em prol de nosso completo aprendizado. Ao auxiliar docente Edilon de Oliveira França, por toda sua atenção, principalmente na ajuda quanto aos ensaios laboratoriais. A bibliotecária Sueli Camargo de Souza, por toda a motivação, boa vontade e atenção em nos ajudar no que precisamos durante este trabalho.

Ao mestre Alexandre Sartori que com sua total dedicação e vasto conhecimento, nos orientou durante toda a elaboração deste estudo, que mesmo com pouco tempo sempre dispôs da sua atenção para nos ajudar, com suas correções, elogios, incentivos e críticas.

Agradecemos a nossas famílias, em especial nossos pais, mães e noivas, pela compreensão nos tempos de ausência em prol de estudo. Sempre acreditaram em nós nesse período, com carinho, amor e paciência, sempre nos incentivando nos momentos delicados.

E um agradecimento especial a Deus, criador de nossa existência, por nos dar força, sabedoria e conhecimento para enfrentar esse desafio.

E ainda se vier noites traiçoeiras, se a cruz pesada for Deus estará contigo, o mundo pode até fazer você chorar, mas Deus te quer sorrindo.

*Pe. Marcelo Rossi*

OLIVEIRA, Peterson Danilo; SOUZA, Alan Douglas Silva e. **Estudo do mecanismo de corrosão intergranular em liga soldada de alumínio AA 5083, em concentração de 50% de ácido clorídrico**. 2017. 55p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2017.

## RESUMO

A liga de alumínio AA 5083 (3% de magnésio em peso) é muito utilizada principalmente em ambientes marítimos, devido sua elevada resistência á corrosão. Em contrapartida esta liga se torna susceptível ao tratamento térmico denominado sensitização, ou seja, o magnésio deixa de estar em solução sólida na matriz metálica, e é atraído para migrar aos contornos de grãos, resultando no mecanismo de corrosão intergranular. No presente estudo foram utilizadas quatro amostras soldadas dessa liga, onde duas delas passaram pelo tratamento térmico de sensitização intencionalmente, para provocar o mecanismo de corrosão intergranular, atacada quimicamente em um teste corrosivo com ácido clorídrico. Neste estudo também foi apresentada à influência da soldagem na liga, mostrando que o calor e tempo gerados durante o processo não são suficientes para sensitizar a zona termicamente afetada da mesma, além da determinação da perda de massa de uma amostra sensitizada e de outra sem a sensitização. Avaliou-se que o processo de sensitização deixa a liga AA 5083 susceptível à corrosão intergranular, fazendo com que a mesma se degrade em pouco tempo e também comprovou-se que o tempo e calor gerados durante o processos de soldagem são insuficientes para realizar a sensitização do material.

Palavras-chave: Liga de alumínio, tratamento térmico, sensitização, corrosão intergranular, influência da soldagem.

OLIVEIRA, Peterson Danilo; SOUZA, Alan Douglas Silva e. **Study of the intergranular corrosion mechanism in aluminum alloy AA 5083, in 50% concentration of hydrochloric acid.** 2017. 55p. Graduation Work (Course Metallurgical Processes). University of Technology Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2017.

## **ABSTRACT**

The aluminum alloy AA 5083 (3% of magnesium by weight containing) is used a lot, mainly in marine environments, due to its high corrosion resistance. In contrast this alloy becomes susceptible to the heat treatment called sensitization, in other words, the magnesium stop being in solid solution in the metal matrix, and it is attracted to migrate to the grain contours, resulting in the mechanism of intergranular corrosion. In the present study were used four welded samples of this alloy, where two of them went through the heat treatment of feeling intentionally, to provoke the mechanism of intergranular corrosion, attacked in a corrosive test with hydrochloric acid. In this study was also presented to the influence of welding in the alloy, showing whether the heat and time generated during the process are sufficient to sensitize the thermally affected zone of the same, besides the determination of the loss of mass of a sensitized sample and of another without the sensitization. It was evaluated that the sensitization process leaves the AA 5083 alloy susceptible to intergranular corrosion, causing it to degrade in a short time and it has also been proven that the time and heat generated during the welding processes are insufficient to perform the sensitization of material.

Keywords: Aluminum alloy, heat treatment, sensitization, intergranular corrosion, influence of welding

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ligas de alumínio.....	25
Tabela 2 - Série Galvânica .....	34
Tabela 3 - Pesos iniciais das amostras que serão submetidas ao teste corrosivo em ácido clorídrico.....	42
Tabela 4 - Comparação da Perda de Massa das amostras .....	46

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação da Perda de Massa das amostras em Porcentagem.....	47
---	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Contorno de grão.....	28
Figura 2 - Deformação Plástica.....	29
Figura 3 - Deformação Plástica por escorregamento de planos atômicos.....	29
Figura 4 - Defeitos de reticulado cristalino .....	30
Figura 5 - Modelo de discordâncias .....	30
Figura 6 - Diagrama de equilíbrio Al-Cu.....	32
Figura 7 - Corrosão por esfoliação em tubo de aço .....	35
Figura 8 - Corrosão em fresta se desenvolvendo.....	36
Figura 9 - Corrosão intergranular ou intercrystalina .....	36
Figura 10 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças ..	39
Figura 11 - Soldagem por pressão.....	39
Figura 12 - Soldagem por fusão.....	40
Figura 13 - Microscópio Óptico .....	40
Figura 14 - Escala de reatividade dos metais .....	41
Figura 15 - Corpos de prova da liga AA 5083 .....	42
Figura 16 - Tratamento térmico de sensibilização entre 60° e 180°C por 72 horas no forno mufla.....	43
Figura 17 - Teste em ácido clorídrico com concentração de 50% por 24 horas .....	44
Figura 18 - Amostrada embutida á quente por baquelite.....	44
Figura 19 - Amostra da Liga AA 5083 no estado laminado, polido com aumento de 200x, revelando as fases presentes .....	48
Figura 20 - Região da solda sem tratamento de sensibilização com aumento de 50x .....	48
Figura 21 - Microestrutura do metal não sensibilizado com aumento de 200x.....	49
Figura 22 - Microestrutura do metal sensibilizado com aumento de 200x.....	49
Figura 23 - Microestrutura superficial da amostra não sensibilizada após o teste corrosivo com aumento de 200x .....	50
Figura 24 - Microestrutura superficial da amostra sensibilizada após o teste corrosivo com aumento de 200x .....	50
Figura 25 - Aumento em 200x da microestrutura da ZTA da amostra não sensibilizada sem teste corrosivo e ataque químico com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> .....	51
Figura 26 - Aumento em 200x da microestrutura da ZTA da amostra sensibilizada sem teste corrosivo e ataque químico com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> .....	51

## Sumário

1	Introdução.....	15
2	Revisão Bibliográfica .....	16
2.1	O Metal Alumínio.....	16
2.2	Obtenção do Alumínio.....	16
2.3	Laminação do Alumínio .....	17
2.3.1	Laminação a quente.....	17
2.3.2	Laminação contínua.....	18
2.3.3	Laminação a frio .....	18
2.4	Refusão .....	19
2.5	Ligas de Alumínio .....	20
2.5.1	Princípios das ligas .....	20
2.5.2	Elementos de liga .....	20
2.5.3	Ligas Trabalháveis Não-Tratáveis Termicamente.....	21
2.5.4	Ligas Trabalháveis Tratáveis Termicamente .....	21
2.6	Efeitos dos Elementos de Liga.....	22
2.6.1	Série 1000 .....	22
2.6.2	Série 2000 .....	23
2.6.3	Série 3000 .....	23
2.6.4	Série 4000 .....	23
2.6.5	Série 5000.....	23
2.6.6	Série 6000 .....	24
2.6.7	Série 7000 .....	24
2.6.8	Série 8000 .....	24
2.7	Nomenclatura das Ligas de Alumínio .....	25
2.7.1	Classificação .....	25
2.7.2	Ligas de Alumínio .....	25
2.7.3	Nomenclaturas básicas .....	25
2.7.4	Classificação das Têmperas “H”.....	26
2.7.5	Classificação das Têmperas “T” .....	26
2.8	Princípios da Metalurgia Física .....	27
2.8.1	Estrutura cristalina .....	27
2.8.2	Contornos de grão.....	28
2.8.3	Modelo de deformação plástica dos metais.....	28
2.8.4	Defeitos do reticulado cristalino.....	29
2.8.5	Mecanismo de endurecimento das ligas de alumínio .....	30
2.8.6	Interação de discordâncias entre si (encruamento).....	31
2.8.7	Interação entre discordâncias e átomos (atmosfera).....	31
2.8.8	Solubilização e precipitação.....	31

2.9	Corrosão.....	32
2.9.1	Resistência a corrosão.....	32
2.9.2	Aplicações típicas de resistência a corrosão.....	33
2.9.3	Tipos de corrosão.....	33
2.10	Aplicação do Alumínio.....	36
2.10.1	Uso nas indústrias civil, automobilística, maquinário, equipamentos, química e medicinal.....	36
2.11	Soldagem.....	37
2.11.1	Processo de soldagem.....	37
2.11.2	Definição de soldagem.....	38
2.11.3	Escolha do metal de adição.....	38
2.11.4	Formação da junta soldada.....	38
2.12	Metalografia.....	40
2.13	Ácido Clorídrico em metais.....	41
3.	Materiais e Métodos.....	42
3.1	Materiais.....	42
3.2	Métodos.....	42
3.2.1	Tratamento Térmico de Sensitização.....	43
3.2.2	Teste corrosivo em Ácido Clorídrico.....	43
3.2.3	Preparação Metalografica.....	44
3.2.3.1	Embutimento.....	44
3.2.3.2	Lixamento e Polimento.....	45
3.2.3.3	Ataque Químico.....	45
4.	Resultados e Discussões.....	46
4.1	Perdas de Massa.....	46
4.1.1	Representação Gráfica.....	46
4.2	Análise Metalográfica.....	47
4.2.1	Microestrutura da Liga na condição Laminado.....	47
4.2.2	Microestrutura da Solda sem Tratamento Térmico de Sensitização.....	48
4.2.3	Microestrutura pós-ataque químico nas amostras com e sem sensitização que não sofreram o teste corrosivo com ácido clorídrico.....	48
4.2.4	Análise superficial das amostras com e sem sensitização após o teste corrosivo em ácido clorídrico.....	49
4.2.5	Influência da solda na microestrutura do metal na condição laminada e polida.....	50
5	Conclusão.....	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

# 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da necessidade de se obter um produto que tenha resistência mecânica e também e seja resistente a corrosão, cresce o uso do alumínio pelo mercado metalúrgico, pois suas características se adequam as propriedades exigidas.

Dentre as diversas aplicações, é possível utilizar diferentes tipos de ligas, obtendo um produto conforme necessidade do mercado.

O material escolhido para a realização do estudo foi uma liga soldada do grupo 5xxx com teor de magnésio de mais de 3%, AA5083. As ligas do grupo 5xxx possuem duas fases: a fase alfa  $\alpha$  (uma solução sólida de magnésio), e a fase beta  $\beta$  (um composto intermetálico  $Mg_2Al_3$ ) que se precipitam em rede contínua no contorno de grão quando exposta a temperaturas elevadas por tempos prolongados. Devido sua boa resistência mecânica e também de corrosão, essa liga é muito utilizada na fabricação de embarcações marítimas, silos de armazenamento de grãos e tanques de armazenamentos de alguns produtos químicos, porém quando exposta a sensitização, fica exposta a corrosão intergranular.

Nos processamentos térmicos deve-se levar em consideração a fragilização da resistência a corrosão deste material, a liga AA 5083 torna-se susceptível a corrosão intergranular quando é exposta a temperaturas em torno de  $60^\circ$  a  $180^\circ$  por tempos prolongados.

Este fenômeno é conhecido como sensitização, que está associada com a dissolução seletiva da fase  $\beta$  ( $Mg_2Al_3$ ), a qual precipita em rede continua em contorno de grão (SARTORI, 2004).

O presente trabalho tem por objetivo comparar o mecanismo de corrosão na liga soldada de alumínio AA5083, na condição laminada e após o tratamento térmico de sensitização, e também analisar a região da solda, mostrando se a mesma sensitiza no momento do processo da soldagem, utilizando como agente corrosivo o ácido clorídrico com concentração de 50%, para o seguinte teste será utilizado a metalografia.

Vale ressaltar que o presente estudo não tem por objetivo avaliar os parâmetros de soldagem, somente mostrar se o tempo e calor gerados durante esse processo são suficientes para sensitizar o material.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O METAL ALUMÍNIO

O alumínio é o metal mais importante entre os metais não ferrosos, chegando a competir com o consumo de ferro e de aço. O grande aumento da utilização do alumínio é devido as suas características físico-químico, em destaque o seu baixo peso específico resistência à corrosão e alta condutibilidade elétrica e térmica (ABAL, 2007).

O alumínio se mostrou uma excelente solução em eficiência energética, segurança e rigidez, sendo assim um metal muito importante para a indústria (PATINI, 2016).

O alumínio foi descoberto por Sir Humphrey Davy em 1809, e foi isolado pela primeira vez em 1825 por H. C. Oersted. E em 1886 foi desenvolvido um processo industrial econômico de redução. Este processo foi desenvolvido por dois cientistas trabalhando independentemente, Charles Martin Hall, nos Estados Unidos, e Paul Louis Héroult, na França, inventaram o mesmo procedimento eletrolítico para reduzir a alumina em alumínio (ABAL, 2007).

Atualmente se utiliza o procedimento Hall-Héroult que consome cerca de 14,8 kWh<sub>cc</sub> para produzir cerca de 1 kg de alumínio primário. O óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é abundante na crosta terrestre. A bauxita tem o teor de óxido entre 35% a 45% (ABAL, 2007).

O Brasil detém a terceira maior jazida de bauxita do mundo, também possui grande potencial energético, assim tendo um grande potencial para a fabricação de alumínio, através de eletrolise (ABAL, 2007).

No início da descoberta do metal alumínio, devido ao seu alto custo de produção, ele era utilizado na fabricação de estatuetas e placas comemorativas. Com o aumento produtivo do alumínio, ele começou a ser utilizado na fabricação de bandejas e escovas de cabelo. No século XIV, o alumínio começa a ser utilizado em grandes proporções em utensílios de cozinha (ABAL, 2007).

No início do século XX, as indústrias começaram a realizar experimentos, pelo método de tentativa e erro, observando as características obtidas pelo alumínio a partir da adição de ligas metálicas (ABAL, 2007).

### 2.2 OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO

Para obtenção do alumínio se realiza as seguintes etapas:

**Moagem:** A bauxita é transportada da mina para a usina, onde é lavada para eliminar a argila e é realizado o processo de britagem, antes de ser transportada para o refino (HYDRO, 2016).

**Alumina:** O óxido de alumínio (alumina) é extraído da bauxita por meio de refinamento (HYDRO, 2016).

**Processo de refinamento:** Para se obter a alumina é realizada a dissolução da bauxita em uma solução aquecida de soda cáustica e cal (HYDRO, 2016).

**Alumina pura:** Esta solução é aquecida e filtrada, assim a alumina remanescente é seca, se transformando em um pó branco. (HYDRO, 2016).

O método mais utilizado para obtenção de alumínio se chama Bayer, onde a alumina é dissolvida em soda caustica e filtrada para a cristalização da alumina. Após a secagem e a calcinação para eliminação de umidade o material é enviado para o processo de redução, através de eletrólise (Hall-Héroult) (ABAL, 2007).

Na obtenção do alumínio, a alumina é carregada em um eletrólito fundido composto por sais de criolita e fluoreto de alumínio, e através da passagem de corrente elétrica, se realiza a redução da alumina por eletrolise, obtendo-se assim, o alumínio. (ABAL, 2007).

O alumínio líquido pode ser fundido em lingotes de extrusão, lingotes de laminagem ou ligas de fundição, dependendo do uso que se vai dar ao alumínio (HYDRO, 2016).

## 2.3 LAMINAÇÃO DO ALUMÍNIO

Laminação é um processo de transformação mecânica, onde se realiza a redução da seção transversal do metal, por meio do contato com forças de compressão originadas da passagem do metal entre os cilindros de laminação, com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos, fabricando produtos laminados planos de alumínio e suas ligas, capas ou folha (ABAL, 2004).

### 2.3.1 Laminação a Quente

O Metal é aquecido a aproximadamente 500°C, para a realização do desbaste das placas, assim submetendo o material a grandes reduções de espessura, onde o material atinge uma temperatura aproximada, a da temperatura de recristalização do alumínio (350°C), onde a ductilidade do material é a mais elevada, pois ocorre a recristalização do material. A matéria prima do processo de laminação é uma placa produzida por fundição (ABAL, 2004).

Devido à superfície irregular e a segregações na superfície da placa, a mesma é submetida à usinagem, para a remoção da camada de óxido de alumínio superficial da placa (faceamento) (ABAL, 2004).

A laminação a quente promove o refino de grão devido à deformação a quente, da recristalização dinâmica e da recristalização estática (ABAL, 2004).

Após a laminação a quente, os grãos ficam alongados de acordo com a direção de laminação e devido ao calor gerado durante a deformação, após o último passe de laminação a quente, ocorre a recristalização estática, sendo afetado o tamanho de grão, textura, resistência, resistência mecânica, estabilidade térmica, tendência à recristalização, trabalhabilidade a frio e acabamento superficial (ABAL, 2004).

A laminação a quente ocorre em laminados reversíveis duos (dois cilindros) ou quadros (dois cilindros de trabalho e dois de apoio ou encostos) (ABAL, 2004).

O material laminado se desloca entre os cilindros, onde a abertura dos mesmos define a espessura dos passes. No último passe de laminação, o material apresenta-se com espessura ao redor de 6 mm, sendo enrolado ou cortado em chapas planas constituindo-se na matéria-prima para o processo de laminação a frio (ABAL, 2004).

### **2.3.2 Laminação Contínua**

O processo de fundição contínua, também conhecido como “Caster”, utilizado para a eliminação da etapa de laminação a quente, o alumínio é solidificado entre dois cilindros que são refrigerados internamente por água, produzindo chapas com seção retangular e espessura aproximada de 6 mm. Após este processo a chapa é enrolada, obtendo-se assim, uma chapa similar à chapa produzida por laminação a quente, mas com estrutura bruta de fusão, bastante refinada pela alta eficiência do refinador de grão utilizado no vazamento (ABAL, 2004).

### **2.3.3 Laminação a Frio.**

O processo de laminação a frio consiste na redução do material em temperaturas bem inferiores a aquela da recristalização do alumínio, onde as matérias-primas provêm da laminação a quente (ABAL, 2004).

A laminação a frio tem como principal função gerar o encruamento do metal, ou seja, promover ganho de resistência mecânica no mesmo, além de garantir um bom acabamento superficial. (ABAL, 2004).

A laminação a frio produz chapas com acabamentos comuns (sem brilho reflexivo) até acabamento brilhante (espelhado ou polido) (ABAL, 2004).

Devido à deformação a frio ocorre o encruamento ao alumínio, onde ocorre o aumento dos limites de resistência à tração e diminuição do alongamento (ABAL, 2004).

O número de passes depende da espessura da liga e da tempera do produto desejado. Os laminadores estão dimensionados para reduções de seções entre 30% e 70% por passe, dependendo, também, das características do material (ABAL, 2004).

Na laminação a frio utilizam-se dois recursos: Tensões avante e a ré, que avaliam o esforço de compressão exercido pelos cilindros ou aumentam a capacidade de redução por passe. Esse recurso é quase que responsável pela redução da espessura no caso de laminação de folhas finas, onde, praticamente, os cilindros de laminação estão em contato sem abertura perceptível (ABAL, 2004).

Segundo ABAL (2004) uma unidade de laminação a frio necessita basicamente de:

- Refiladeira
- Tesoura para o corte de chapas planas e de discos
- Fornos de recozimento.

## 2.4 REFUSÃO

Os materiais são selecionados na área de sucata para assim ter início ao processo de refusão, onde o material é separado de acordo com a liga a ser produzida, realizado o carregamento do forno de fusão (ESAF; IBRAP, 2017).

O forno é elevado a temperaturas acima de 660° C para assim realizar a refusão do material desejado, neste processo ocorre à separação de impurezas. Após o processo de fusão o material será filtrado e corrigido, conforme a liga desejada (ESAF; IBRAP, 2017).

Através de análise da composição do material, será distinguida a necessidade de adição de elementos de liga, para assim ser realizada a correção do mesmo (ESAF; IBRAP, 2017).

O alumínio líquido, com a sua composição química corrigida, de acordo com a liga escolhida, segue para a fase de desgaseificação, para promover a retirada do hidrogênio no alumínio, seguindo para o processo de vazamento (ESAF; IBRAP, 2017).

O metal líquido será resfriado e solidificado na de tarugos, de acordo com o diâmetro do molde que foi escolhido. Estes tarugos serão levados para o forno de homogeneização, sendo aquecidos por determinado tempo e temperatura, variando de acordo com o diâmetro e a liga do tarugo, sendo em seguida resfriados nos bancos de resfriamento (ESAF; IBRAP, 2017).

Este processo tem o propósito de reorganizar e controlar a microestrutura do material, para realizar a melhoria de suas características metalúrgicas, estando o tarugo pronto para ser utilizado (ESAF; IBRAP, 2017).

## 2.5 LIGAS DE ALUMINIO

### 2.5.1 Princípios das ligas

Devido à grande quantidade de ligas de alumínio, é difícil adotar uma nomenclatura ou simbologia, para realizar a classificação das mesmas. As classificações das ligas de alumínio são realizadas pelas empresas fabricantes, as diversas associações de fabricantes e de normas e especificações (SENAI, 2002).

O Alumínio fundido dissolve outros metais e substâncias metalóides, como o silício, que atua nesse aspecto como metal. Assim quando resfriado, os constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida (ABAL, 2007).

Assim tornando a estrutura do metal mais rígida, com os arranjos cristalinos formando uma rede cristalina regular, com átomos de tamanho diferentes do metal base (ABAL, 2007).

Uma das principais limitações do alumínio é a sua baixa temperatura de fusão (660 °C), o que limita a temperatura de trabalho de suas ligas (VIANA et al. 2009).

A fabricação de aviões realizados totalmente com metais se tornou possível devido ao uso de ligas tratadas termicamente e com resistência suficiente, contendo uma pequena porcentagem de cobre e magnésio (ABAL, 2007).

O envelhecimento é usado em ligas que contenham magnésio e silício, aplicada nas principais ligas estruturais de engenharia. Durante o mesmo período, trabalho pioneiro foi realizado no campo das ligas de alumínio-magnésio, amplamente utilizadas atualmente na indústria naval (ABAL, 2007).

No período entre as duas guerras mundiais, ocorreu o descobrimento do processo de anodização e a introdução de uma utilização particular das ligas de fundição, que permitiram um maior aproveitamento das sucatas de aviões (ABAL, 2007).

### 2.5.2 Elementos de Liga

As ligas metálicas são composições formadas por dois ou mais elementos, onde pelo menos um deles é um metal (FOGAÇA, 2014).

O alumínio se torna muito atrativo devido à capacidade de combinar-se com a maioria dos metais formando ligas, obtendo assim características mecânicas de acordo com a aplicação do produto final. Para melhor aplicação, é necessário conhecer as vantagens e limitações de cada liga, para melhor selecionar o material correto (ABAL, 2007).

As ligas oferecem à indústria uma grande variedade de propriedades de resistência mecânica, resistência à corrosão e o ataque de substâncias químicas, condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductibilidade, formabilidade, etc. (ABAL, 2007).

A função de cada elemento de liga se altera com a quantidade dos elementos presente na mesma, e também pela interação com outros elementos. Existem elementos que conferem características principais como a resistência mecânica, resistência a corrosão, entre outras. Os elementos que tem função acessória, como controle de microestrutura e das impurezas (ABAL, 2007).

Dependendo do grupo de ligas, um determinado elemento químico tem função como adição ou é indesejado como impureza, um exemplo disso é o chumbo, que é adicionado às ligas de usinagem pelo seu efeito “quebra-cavacos” mais por ser um metal pesado sofre fortes restrições em produtos que entram em contato com alimentos (ABAL, 2007).

As ligas de alumínio não ligado contêm entre 99% e 99,5% de alumínio, sendo o restante principalmente, ferro e silício (ABAL, 2007).

### **2.5.3 Ligas Trabalháveis Não-Tratáveis Termicamente**

As ligas não tratáveis não são endurecidas por meio de tratamento térmico (VIANA et al. 2009).

Nas ligas não tratáveis, ocorrem o endurecimento a partir de elementos de liga em sua composição química, tais como manganês, silício, ferro e magnésio, isoladamente ou em várias combinações. Estas ligas são designadas nas series 1000, 3000, 4000 e 5000. Essas ligas são endurecidas por conformação, para obter maior endurecimento, poder realizar vários níveis de trabalho a frio, identificados pela serie H de temperas (SARTORI, 2004).

As ligas que contêm quantidades apreciáveis de magnésio, quando submetidas a temperas de encruamento recebem um tratamento final a baixas temperaturas, chamado de estabilização, para garantir a estabilidade das propriedades (SARTORI, 2004).

### **2.5.4 Ligas Trabalháveis Tratáveis Termicamente**

Ligas tratáveis termicamente são endurecidas por meio de tratamento térmico (VIANA et al. 2009).

Para realizar o aumento da resistência inicial das ligas é adicionados elementos de liga tais como cobre, magnésio, zinco e silício (SARTORI, 2004).

Estes elementos, de forma isolada ou combinada, apresentam um aumento de solubilidade no alumínio com aumento de temperatura, permitindo assim, o endurecimento da liga, quando realizado tratamento térmico (SARTORI, 2004).

Tratamento térmico de solubilização - ocorre elevando a temperatura para manter os elementos solúveis em solução sólida. Após este processo se resfria bruscamente o material, geralmente em água ou outro líquido refrigerante que congela temporariamente a estrutura e, por um curto período de tempo (SARTORI, 2004).

As ligas não são estáveis após o congelamento, assim, tem início à precipitação dos constituintes da solução supersaturada, processo denominado de envelhecimento natural, e partir de vários dias à temperatura ambiente, pode ocorrer o aumento da resistência da liga (SARTORI, 2004).

Muitas ligas apresentam uma condição estável à temperatura ambiente, mas outras ligas, que contêm magnésio e silício ou magnésio e zinco, continuam o processo de endurecimento por envelhecimento por longos períodos de tempo à temperatura ambiente (SARTORI, 2004).

Aplicando um aquecimento controlado a uma temperatura ligeiramente superior que a ambiente pode ocorrer um aumento da resistência da liga e a estabilidade das propriedades. Este processo é chamado de envelhecimento artificial ou endurecimento por precipitação (SARTORI, 2004).

Para se obter maior resistência mecânica pode-se promover a combinação adequada da solubilização, envelhecimento artificial e trabalho a frio (SARTORI, 2004).

## 2.6 EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA

### 2.6.1 Série 1000

O metal alumínio com 99% de pureza ou superior, é muito utilizado em processos elétricos e químicos, possuindo ainda muitas outras aplicações, devido a sua excelente resistência a corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, baixas propriedades mecânicas e excelentes trabalhabilidade (SARTORI, 2004).

Para obter um aumento moderado na resistência do material, podem ser obtidos por deformação (encruamento). Ferro e silício são as maiores impurezas (SARTORI, 2004).

### **2.6.2 Série 2000**

O Cobre é o elemento de liga principal na série 2000. Nas ligas da serie 2000 é realizado tratamento térmico de solubilização para obter propriedades mecânicas adequadas – similares e às vezes superiores às do aço doce (SARTORI, 2004).

Para obter aumento das propriedades mecânicas é utilizado o processo de envelhecimento artificial, onde ocorre o aumento o limite de escoamento, com consequente diminuição do alongamento (SARTORI, 2004).

Possui baixa resistência a corrosão comparada com outras ligas de alumínio. Estas ligas são muito utilizadas na forma de chapas e são protegidas por clad, ou seja, as chapas são inseridas entre duas outras chapas de alta pureza ou de ligas de magnésio silício, oferecendo assim maior proteção quando expostos a meios corrosivos (SARTORI, 2004).

### **2.6.3 Série 3000**

O Manganês é o elemento de liga principal nas ligas deste grupo. Esta serie não são tratáveis termicamente (SARTORI, 2004).

A adição de manganês é limitada em torno de 1,5%, sendo usado como elemento principal em algumas ligas, uma delas, no entanto, é a popular AA3003, que é amplamente usada como liga de utilização genérica para a aplicação de esforços moderados, requerendo boa trabalhabilidade (SARTORI, 2004)

### **2.6.4 Série 4000**

O silício é o principal elemento de liga neste grupo e é responsável por provocar a redução do ponto de fusão sem influenciar fragilização nas ligas resultantes (SARTORI, 2004).

As ligas de alumínio e silícios são usadas para fios de solda e como ligas para brasagem, onde exigem ponto de fusão mais baixo do que o do metal base. Muitas ligas nesta serie não são tratáveis termicamente (SARTORI, 2004).

### **2.6.5 Série 5000**

O Magnésio é o principal elemento e liga neste grupo sendo um dos elementos de liga mais utilizado para ligas de alumínio, pois é mais efetivo (SARTORI, 2004).

Usado como elemento de liga principal ou com manganês, resulta em uma liga não tratável termicamente com resistência mecânica de moderada a alta. O Magnésio é mais efetivo que o manganês (SARTORI, 2004).

A adição de magnésio na faixa de 0,8% equivale a 1,25% de manganês, podendo ser adicionado em quantidades maiores, onde ligas nesta série possuem boas características de soldagem e boa resistência à corrosão em atmosferas marítimas. No entanto existem certas limitações que devem ser observadas na quantidade de trabalho a frio e nas temperaturas de trabalho permitidas para as ligas que contêm teores de magnésio acima de 3%, de forma a evitar suscetibilidade à corrosão sob tensão e esfoliação (SARTORI, 2004).

#### **2.6.6 Série 6000**

A liga no grupo 6000 contém silício e magnésio em proporções aproximadas para formar o precipitado ( $Mg_2Si$ ), para que esta liga seja tratável termicamente onde a principal liga nesta série é a AA6061, uma das mais versáteis tratáveis termicamente. Esta liga oferece menor resistência mecânica do que a maioria das ligas dos grupos 2000 ou 7000, mas possuem boa formabilidade e resistência a corrosão com média resistência mecânica (SARTORI, 2004).

#### **2.6.7 Série 7000**

O zinco é o elemento de liga principal neste grupo e para poder ser tratado termicamente, ele é combinado com pequenas quantidades de magnésio, normalmente, outros elementos, tais como cobre e cromo, também são adicionados em pequenas quantidades. A liga mais conhecida deste grupo é a AA7075, que está entre as mais resistentes disponíveis e é usada em estruturas aeronáuticas entre outras aplicações que requerem elevada resistência mecânica. A resistência à corrosão é similar à das ligas da série 2000 (SARTORI, 2004).

#### **2.6.8 Série 8000**

Esta série é utilizada para ligas que não se enquadram nas séries acima (SARTORI, 2004).

## 2.7 NOMECLATURAS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO.

### 2.7.1 Classificação

A classificação do alumínio e suas ligas são utilizadas para caracterizar elemento de liga e qualquer elemento intencionalmente adicionado para este propósito, exceção aos que são adicionados como refinadores de grão (ABAL, 2011).

### 2.7.2 Ligas de Alumínio

O primeiro dígito da designação indica o grupo de ligas de acordo com a Tabela 1 (ABAL, 2011).

Tabela 1 - Ligas de alumínio

Principais elementos de liga	Grupo
a) Alumínio não-ligado com, no mínimo, 99,00% de pureza:	1XXX
b) Liga de alumínio agrupado segundo elemento de liga principal:	
Cobre	2XXX
Manganês	3XXX
Silício	4XXX
Magnésio	5XXX
Magnésio e silício	6XXX
Zinco	7XXX
Outros elementos	8XXX
c) Serie não utilizadas	9XXX

Fonte: ABAL, 2011

O segundo dígito da designação indica o elemento de liga que foi adicionado, ou seja, a modificação na liga original ou dos limites de impurezas (ABAL, 2011).

Os dois últimos dígitos da designação identificam a liga de alumínio ou indicam a pureza do alumínio (ABAL, 2011).

### 2.7.3 Nomenclaturas Básicas

A letra “F” (como fabricado) é utilizada para produtos com nenhum controle sobre a temperatura de fabricação ou nível de encruamento, assim não especificando as propriedades mecânicas dos mesmos (ALCAN, [s.d.]).

A letra “O” (recozimento) é utilizada em materiais que apresentam menor resistência mecânica, obtida por tratamentos térmicos em sua fabricação (ALCAN, [s.d.]).

A letra “H” (encruado) é usada em ligas não tratáveis termicamente, onde o aumento das propriedades mecânicas é alcançado a partir de deformação plástica a frio, e que posteriormente podem ser submetidas a tratamentos térmicos obtendo as propriedades mecânicas desejadas e acordo com o tratamento térmico aplicado no material (ALCAN, [s.d.]).

#### **2.7.4 Classificação das Temperas “H”**

Na classificação de temperas o número que segue a letra “H” indica a operação, como indicado:

Os materiais apenas encruados recebem a nomenclatura de “H1”. Estes materiais não têm nenhum tratamento, obtendo as propriedades mecânicas pelo tratamento a frio (ALCAN, [s.d.]).

Os materiais encruados e recozidos parcialmente recebem a nomenclatura “H2”, onde o tratamento térmico de recozimento parcial é exigido para diminuir as propriedades mecânicas adquiridas pelo trabalho a frio (ALCAN, [s.d.]).

Os materiais encruados e estabilizados recebem a nomenclatura de “H3”. Este tratamento é aplicado em ligas que perdem suas propriedades mecânicas com o passar do tempo, assim estabilizando as propriedades mecânicas do material (ALCAN, [s.d.]).

#### **2.7.5 Classificação das Têmperas “T”**

Para indicar a sequência de trabalho que o material foi submetido, usa-se as sequências de números de 1 a 10 conforme abaixo:

Materiais que foram resfriados após o processo de fabricação em altas temperaturas e envelhecidos naturalmente até a condição estável recebem a nomenclatura de “T1” (ALCAN, [s.d.]).

Materiais que foram resfriados após o processo de fabricação em altas temperaturas, posteriormente deformados plasticamente a frio e envelhecidos naturalmente até a condição estável recebem a nomenclatura de “T2” (ALCAN, [s.d.]).

Materiais que foram deformados plasticamente a frio e envelhecidos naturalmente até a condição estável recebem a nomenclatura de “T3” (ALCAN, [s.d.]).

Os materiais que foram solubilizados e envelhecidos naturalmente até condição estável, recebem a nomenclatura de “T4” (ALCAN, [s.d.]).

Materiais que foram resfriado após o processo de fabricação em altas temperaturas e envelhecido artificialmente, recebem a nomenclatura de “T5” (ALCAN, [s.d.]).

Materiais que foram solubilizados e envelhecidos artificialmente recebem a nomenclatura de “T6” (ALCAN, [s.d.]).

Materiais que foram solubilizados e estabilizados (super envelhecimento) recebem a nomenclatura de “T7” (ALCAN, [s.d.]).

Materiais que foram solubilizados, deformados plasticamente a frio e envelhecidos artificialmente, recebem a nomenclatura de “T8” (ALCAN, [s.d.]).

Materiais Solubilizados, envelhecidos artificialmente e seguidamente deformados plasticamente a frio, recebem a nomenclatura de “T9” (ALCAN, [s.d.]).

Materiais resfriados após o processo de fabricação a altas temperaturas, deformados plasticamente a frio e em seguida envelhecido artificialmente, recebem a nomenclatura “T10” (ALCAN, [s.d.]).

## 2.8 PRINCIPIOS DA METALURGIA FISICA

### 2.8.1 Estrutura cristalina

As propriedades dos materiais são determinadas pela maneira em que os átomos estão agrupados, ou seja, a forma em que os átomos estão ligados entre si (ABAL, 2011).

Na temperatura de 2540° C o alumínio esta no estado gasoso, sendo assim impossível saber a posição de um átomo e a posição da vizinhança. Abaixo de 660° C está na condição sólida, onde seu arranjo atômico é compacto e organizado, com agrupamentos atômicos em disposição determinada (célula unitária) repetindo-se nas três direções formando um cristal perfeito e no estado liquido , existe uma ordenação chamada de ordenação de curta distancia, onde existe arranjo de átomos definidos, mas não se consegue definir a posição e a orientação dos mesmos e sua vizinhança (ABAL, 2011).

O alumínio apresenta arranjo atômico no sistema cúbico de face centrada (CFC), demonstrado pela representação de empilhamento atômico compacto, em que os átomos são representados como esferas rígidas tocando-se umas nas outras.

Há alguns anos, dizia-se que não seria possível obterem-se imagens de átomos nem com o auxílio do microscópio eletrônico mais potente, mas na década de 1980, Gerd Binnig e Heinrich Rohrer inventaram o microscópio de varredura por efeito de tunelamento, permitindo a visualização de imagens da ordem de grandeza de átomos. Imagens obtidas do reticulado do alumínio confirmam o que havia sido medido de maneiras indiretas (ABAL, 2011).

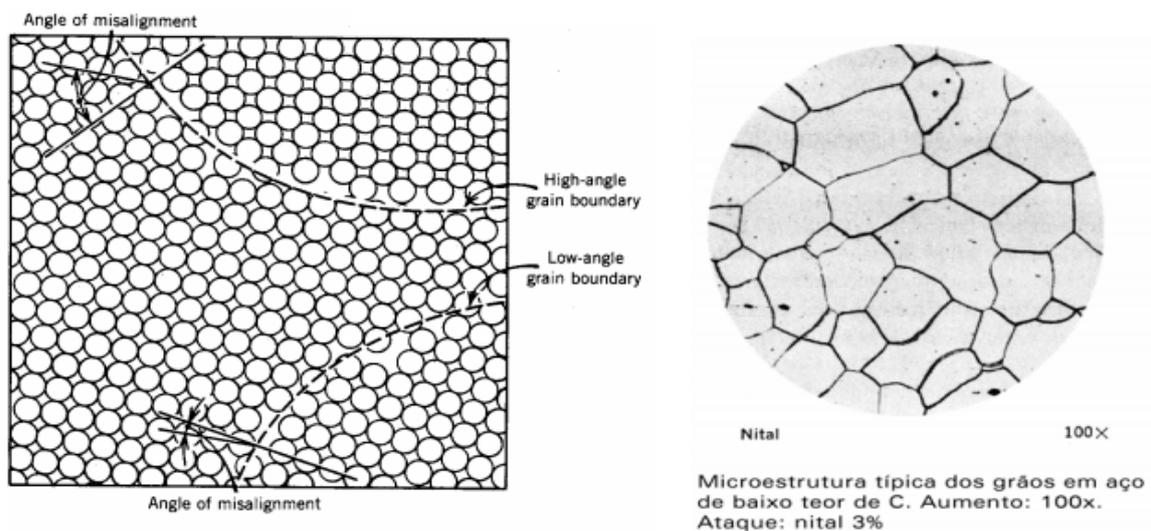
Nos metais comerciais, cristais com orientações diversas estão agrupados formando um material policristalino e o encontro desses grãos define uma interface denominada de encontro de grão (ABAL, 2011).

### 2.8.2 Contorno de Grão

O contorno de grão é a superfícies que separam dois grãos ou cristais com diferentes orientações. Quando o grão apresenta desorientação menor que  $10^\circ$ , é chamado de contorno de baixo-ângulo e a região que está separada sub-grão. Quando a desorientação é maior que  $10^\circ$  denomina-se de contorno de grão conforme Figura 1 (MOREIRA, [s.d.]).

Os contornos de grão são regiões mais reativas quimicamente e tendem a reduzir sua área quando em temperaturas elevadas, aumentando o tamanho médio do grão e impurezas tendem a segregar em contornos de grão (diminuem a energia do contorno)(MOREIRA, [s.d.]).

Figura 1 - Contorno de Grão



Fonte: MOREIRA, [s.d.].

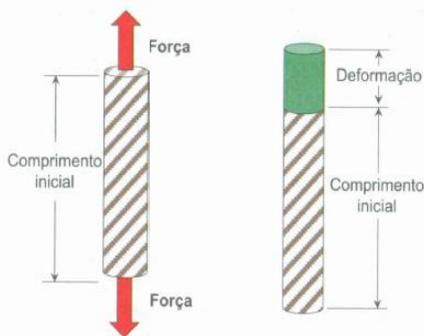
### 2.8.3 Modelo de deformação plástica dos metais

Ao tracionar uma barra metálica, sua seção transversal é diminuída e seu comprimento aumentado. Ao retirar está força e o material voltar a suas dimensões originais, significa que a deformação sofrida é elástica, se a barra não voltar a suas dimensões originais ela sofreu deformação plástica de acordo com Figura 2 (ABAL, 2011).

Quando observamos esta tração no reticulado cristalino, resulta numa tensão de cisalhamento, fazendo com que os átomos saiam de sua posição de equilíbrio no arranjo em relação ao plano vizinho de acordo com Figura 3 (ABAL, 2011).

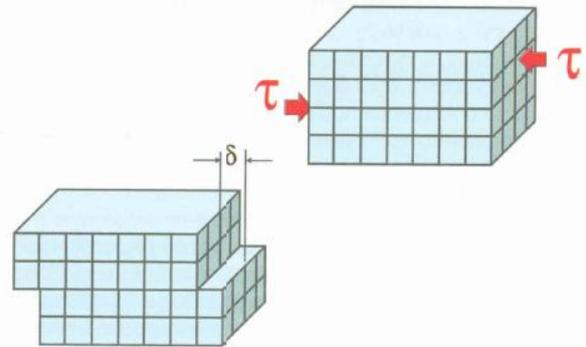
Na deformação elástica, os átomos voltam a sua posição inicial ao ser retirado o esforço, mas na deformação plástica os átomos encontram uma nova posição de equilíbrio, diferente da posição inicial (ABAL, 2011).

Figura 2 - Deformação Plástica



Fonte: ABAL, 2011.

Figura 3 - Deformação Plástica por escorregamento de planos atômicos



Fonte: ABAL, 2011.

#### 2.8.4 Defeitos do reticulado cristalino

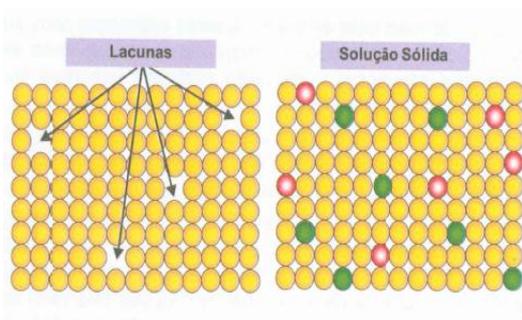
- **Lacuna:** é a posição de um reticulado cristalino que não está ocupado por um átomo de acordo com Figura 4. Esses defeitos cristalinos interferem na difusão, possibilitando que átomos troquem de posição dentro do reticulado onde as lacunas permitem que átomos possam se acomodar na matriz metálica. Aumentando a temperatura aumenta-se também exponencialmente a quantidade de lacunas, assim podemos afirmar que o aquecimento a velocidade da maioria das reações metalúrgicas em estado sólido. Assim quando o metal passa para o estado líquido, significa que existem tantas lacunas que o cristal não é mais capaz de manter sua integridade como sólido (ABAL, 2011).
- **Solução sólida:** As posições do reticulado cristalino são ocupadas por átomos de outro elemento, no caso das ligas de alumínio, os átomos de alumínio são substituídos por átomos de outro elemento. Átomos com dimensões menores podem ocupar os interstícios (ABAL, 2011).

Os elementos têm diferentes raios atômicos, eletro negatividades e valência diferentes, onde a presença desses átomos em solução sólida induz uma perturbação no reticulado cristalino e no metal de base, devendo existir, portanto, um limite para a quantidade de elemento de liga que pode ser mantido em solução sólida de equilíbrio com ele, denominado limite de solubilidade sólida (ABAL, 2011).

- **Discordâncias (ou deslocamentos):** Quando os átomos da parte superior se encontram desalinhados, ou seja, afastado de sua posição de equilíbrio, podemos observar que há um desequilíbrio entre os átomos, pelo desencontro ocorrido pelo escorregamento dos átomos de acordo com Figura 5. O limite entre essas duas regiões desencontradas uma da outra é chamado de linha de discordância. Não há defeitos acima ou abaixo a linha de discordância, é formada apenas pelo deslocamento do reticulado cristalino (ABAL, 2011).

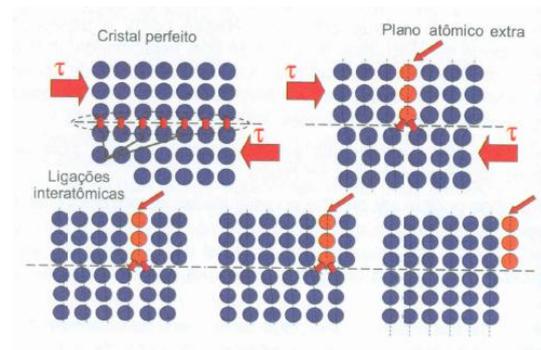
Por essa razão discordâncias são classificadas com defeito de linha, uma discordância é definida pelo plano cristalino em que a linha de discordância se desloca e o vetor que define o seu escorregamento (ABAL, 2011).

Figura 4 - Defeitos de reticulado cristalino



Fonte: ABAL, 2011.

Figura 5 - Modelo de discordâncias



Fonte: ABAL, 2011.

### 2.8.5 Mecanismo de endurecimento das ligas de alumínio

Podemos deduzir um novo modelo de deformação plástica dos metais, o escorregamento de planos atômicos, facilitado pela movimentação de discordâncias. (ABAL, 2011).

Quanto maior for à quantidade de barreiras provenientes da movimentação de discordâncias, maior será a dificuldade de realizar deformações, endurecendo dessa maneira o metal (ABAL, 2011).

### **2.8.6 Interação de discordâncias entre si (encruamento)**

Para promover a deformação em uma barra de alumínio, é necessária uma grande quantidade de energia, assim exigindo equipamentos que tenham o potencial e motores com a potência adequada. 1% a 15% desta energia é acumulada no material na forma de deformação, pela geração de discordâncias dentro do material e a maior parte da energia mecânica aplicada na deformação, é transformada em calor. A deformação a frio aumenta a densidade de discordância no metal, de  $10^6$  cm para  $10^{12}$  cm ou  $10^{13}$  cm de linhas de discordância por  $\text{cm}^3$  de material (mecanismo de fontes de Frank - Read) (ABAL, 2011).

O aumento das discordâncias é chamado de encruamento do material, pois as discordâncias começam a interagir e se combinar. Assim podendo obter propriedades mecânicas elevadas em ligas de alumínio não tratáveis termicamente (ABAL, 2011).

### **2.8.7 Interação entre discordâncias e átomos (atmosfera)**

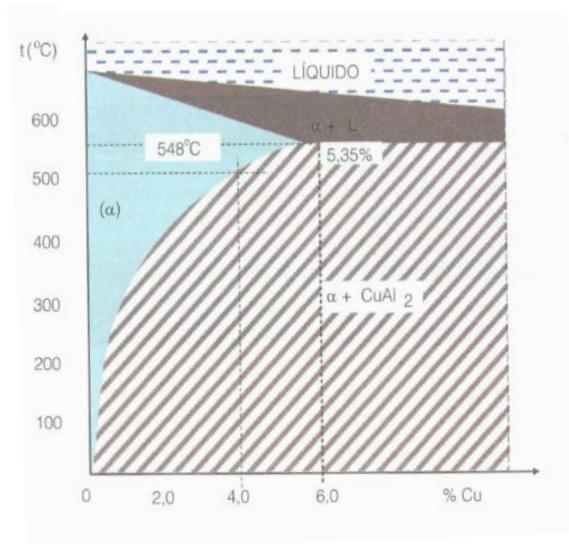
Quando há presença de átomos de tamanhos diferentes no alumínio ocorre à distorção do reticulado cristalino, gerando tensões elásticas na sua vizinhança fazendo com que exista uma configuração entre eles, onde a energia entre soluto e discordância seja minimizada, tendo assim uma condição mais estável (ABAL, 2011).

### **2.8.8 Solubilização e precipitação**

O diagrama Al-Cu ilustrado na Figura 6 é um exemplo de mapa em que pode-se visualizar as temperaturas de concentração de um determinado elemento químico no metal base, indicando as fases presentes na estrutura. Podemos observar no diagrama o limite de solubilidade sólida, onde define a quantidade máxima de cobre em solução sólida a uma dada temperatura. Ultrapassando este limite de solubilidade, o cobre em excesso se precipita formando  $\text{CuAl}_2$  (ABAL, 2011).

Realizando o tratamento de solubilização, é aquecido a liga Al-Cu a uma temperatura que permite a dissolução dos precipitados de  $\text{CuAl}_2$ , mas o resfriamento é feito de maneira rápida suficientemente para reter o cobre em solução sólida assim mantendo a situação esta de condições de equilíbrio, possibilitando que o sistema retome a condição de equilíbrio para que os átomos de cobre sejam expulsos do reticulado de alumínio com a formação de precipitado de  $\text{CuAl}_2$ . Assim os elementos de liga ocupam as posições do reticulado do alumínio na solução sólida supersaturada (ABAL, 2011).

Figura 6 - Diagrama de equilíbrio Al-Cu



Fonte: ABAL, 2011.

## 2.9 CORROSÃO

### 2.9.1 Resistência a Corrosão

O alumínio tem uma grande resistência à corrosão, quando exposto a atmosfera se forma imediatamente uma fina camada de óxido, protegendo o metal de oxidações posteriores, ficando assim completamente protegido contra corrosões (SARTORI, 2004).

O alumínio tem a capacidade de tolerar ambientes corrosivos como ambientes industrial, e também resistente a vários tipos de ácidos. Apesar de ter alta resistência a corrosão, o alumínio é corroído por substâncias alcalinas, pois estas atacam a camada superficial de óxido do alumínio (SARTORI, 2004).

As ligas do grupo 5000 são resistentes a ambientes marinhos, e embora seja resistente a substâncias moderadamente alcalinas com a ajuda de inibidores, deve-se evitar o contato entre ambos (SARTORI, 2004).

Diferentes meios corrosivos que o alumínio tem resistência:

- Água do mar;
- Atmosferas rural, urbana e industrial;
- Álcool (etílico e metílico);
- Ácidos (nítrico 70%, sulfúrico 95%)
- Peróxido de hidrogênio
- Alimentos e produtos químicos

As ligas com capacidade de resistência a corrosão, podem ser protegidas de meios corrosivos, com o auxílio de revestimentos em suas superfícies, usando uma fina camada de alumínio puro ou ligas de alta resistência (SARTORI, 2004).

Contato direto com alguns metais deve ser evitado, para prevenir que ao alumínio sofra corrosão galvânica. Para evitar esta corrosão, utilizam-se isolamentos da área de contato por meio de pintura ou outros materiais isolantes (SARTORI, 2004).

### **2.9.2 Aplicações típicas de resistência a corrosão**

As ligas de alumínio ou o próprio alumínio puro podem ser soldados para produzir tanques de armazenamento, caminhões-tanque, vasos de reações, trocadores de calor, tubulações de processamento, equipamentos de destilação e de processamento (ABAL, 2003).

### **2.9.3 Tipos de corrosão**

Podemos definir a corrosão como a deterioração de um metal através de reação química ou eletroquímica com o meio ambiente. Onde a deterioração acontece de diferentes maneiras, dependendo dos meios corrosivos, temperatura, presença de outros metais e outros fatores (ABAL, 2003).

- **Corrosão uniforme**

Termo utilizado quando a superfície do metal é corroída uniformemente sobre toda sua área (ABAL, 2003).

- **“Pitting”**

“Pitting” é um tipo de corrosão que ocorre em pontos localizados aleatoriamente, formando pequenas cavidades. A penetração de uma cavidade tende a diminuir com o tempo. Certa quantidade de “pitting” pode ser tolerada se a espessura do material for adequada (ABAL, 2003).

- **Corrosão galvânica**

A corrosão que acontece quando diferentes metais ou ligas são acoplados eletricamente na presença de um eletrólito, conhecida como corrosão galvânica, onde a

severidade da corrosão depende da posição dos metais heterogêneos na serie galvânica de acordo com Tabela 2 (ABAL, 2003).

Tabela 2 - Série Galvânica

Série galvânica
Ligas de Mg
Zinco
Ligas de Al-Zn
Ligas de Al-Mg
Ligas da série 1100, 3003, Al-Mg-Si
Cádmio
Ligas de Al-Cu
Aço doce, ferro maleável e ferro fundido.
Cromo
Soldas de chumbo-estanho
Chumbo
Estanho
Latão
Cobre
Bronze
Liga monel
Níquel
Aços inoxidáveis

Fonte: (ABAL, 2003).

- **Corrosão por deposição**

A corrosão por deposição ocorre quando íons de metais pesados, tais como cobre, chumbo, mercúrio, estanho, níquel e cobalto, são depositados galvanicamente sobre o alumínio (ABAL, 2003).

- **Corrosão sob tensão**

O mecanismo de corrosão sob tensão (CST) se torna possível quando um material susceptível a mesma é submetido a aplicações de tensão e colocado em meio corrosivo específico (PINTO, 2006).

O aparecimento de trincas em materiais susceptíveis na combinação de tensão aplicada e meio corrosivo específico, define a corrosão sob tensão (GODEFROID et al. 2003).

- **Corrosão por esfoliação**

A corrosão por esfoliação é um tipo de corrosão que se processa de forma paralela a superfície metálica, conforme a Figura 7. Esta corrosão geralmente ocorre em chapas ou componentes que tiveram seus grãos alongados e achatados, tendo assim inclusões ou segregações, presentes no material, onde o produto de corrosão é volumoso, e ocasiona a separação das camadas contidas entre as regiões que sofrem a ação corrosiva e, como conseqüência, ocorre a desintegração do material em forma de placas paralelas à superfície. Esse tipo de corrosão é mais comum em ligas de alumínio das séries 2.000 (Al, Cu, Mg), 5.000 (Al, Mg em 3%) e 7.000 (Al, Zn, Cu, Mg) (COELHO, 2015)

Figura 7 - Corrosão por esfoliação em tubo de aço



Fonte: COELHO, 2015

- **Corrosão em fresta**

A corrosão por fresta ocorre devido a diferença de potencial, ocorrendo em espaços com acesso de fluidos limitados, ocorrendo a partir de duas superfícies em contato ou muito próximas, assim chamamos estes espaços de fendas ou frestas ilustrado na Figura 8 (SCIENTIAPOTENTIAPLUS,[S.D]).

Podemos usar como exemplos de frestas, lacunas e áreas de contato entre as partes, sob as juntas ou vedações, rachaduras dentro de emendas, espaços preenchidos com depósitos e sob pilhas de lodo. Para o caso da água, sua tensão superficial lhe conduz a se alojar nas fendas disponíveis, assim tendendo a formar uma célula de concentração, que forma pilhas de aeração diferencial, áreas com concentração de oxigênio diferentes, sendo a concentração de oxigênio nas bordas superior à concentração da área mais interna da fenda, tornando esta região anódica, com conseqüente alta taxa de corrosão (SCIENTIAPOTENTIAPLUS,[s.d.])

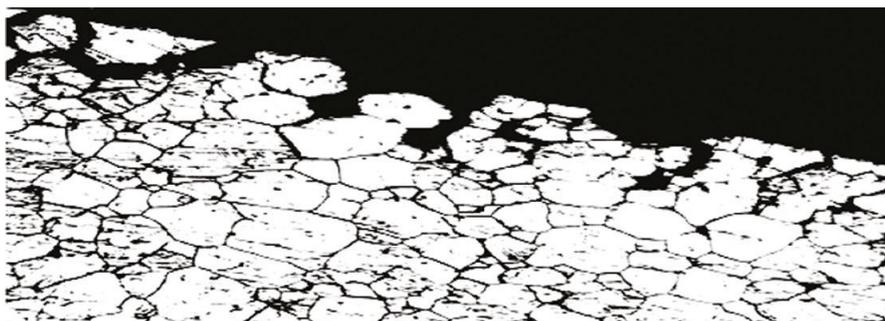


Fonte: SCIENTIAPOTENTIAPLUS,[s.d.]

- **Corrosão Intergranular**

A corrosão intergranular ocorre entre os grãos ou cristais da rede cristalina do material metálico, tendo assim perda de suas propriedades mecânicas resultando na fratura do material quando expostos a esforços mecânicos. Quando ocorre a fratura, a corrosão é chamada de corrosão sobtensão fraturante de acordo com Figura 9 (GENTIL, 1996).

Figura 9 - Corrosão intergranular ou intercristalina



Fonte: GENTIL, 1996.

Existem circunstâncias que tornam a região de um contorno de grão muito reativa, provocando a corrosão intergranular ou intercristalina, como o exemplo de presença de impurezas que enriquecem o contorno de grão por um elemento de liga, provocando assim a corrosão Intergranular (GENTIL, 1996).

## 2.10 APLICAÇÃO DO ALUMÍNIO

### 2.10.1 Uso na indústria civil, automobilística, maquinário, equipamentos, química e medicinal.

O alumínio tem aplicação na indústria de construção civil como esquadrias de alumínio, painéis de revestimento, fachadas envidraçadas, estruturas de alumínio para coberturas, estruturas de alumínio para fechamentos laterais, divisórias, forros, box,

utensílios para a construção, formas de alumínio para paredes de concreto, andaimes, escoras telhas, entre outras tantas soluções que são facilmente montados e manuseados nos canteiros de obras (ABAL, 2017)

Segundo ABAL, 2017, o setor de transportes é o maior consumidor de alumínio no mundo utilizando chapas, folhas, perfis, forjados e fundidos de alumínio que assim promovem o aumento de soluções eficientes para essa indústria, devido as suas propriedades e características, o alumínio esta presente em todos os sistemas e componentes utilizados na fabricação de veículos mais leves, menos poluentes e com melhor desempenho (ABAL, 2017)

As características de leveza, elevada condutibilidade térmica e resistência à corrosão do alumínio são essenciais nos trocadores de calor e aquecedores solares; bem como na fabricação de ferramentas para a mineração, em tubulações para a agricultura e indústria; em máquinas de impressão e têxteis, entre outros, assim se destacando na indústria de maquinas e equipamentos (ABAL, 2017)

O alumínio é bastante empregado em cilindros para gases, vasos de reação, tubulações e tanques de estocagem e criogênicos, pois apresenta condutibilidade elétrica aliada à leveza do alumínio que favorecem sua aplicação na indústria de transformadores, solenóides, relés, capacitores, condutores e outros componentes, em chassis eletrônicos, bases de lâmpadas, também sendo muito difundido no setor gráfico, o metal é ainda largamente utilizado em chapas litográficas para impressão (ABAL, 2017).

## 2.11 SOLDAGEM

### 2.11.1 Processo de soldagem

Considerado como uns dos mais importantes processos de fabricação de peças metálicas, o processo de soldagem é largamente utilizado na recuperação de peças desgastadas, para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para corte. O processo de soldagem apresenta simplicidade operacional, tendo assim uma grande utilização nos processos industriais, mas o processo de a soldagem necessita de alta densidade de energia em um pequeno volume de material, assim ocorrendo importantes alterações estruturais no material. Estas alterações estruturais não podem ser desconsideradas, pois podem resultar em defeitos de fabricação inesperados, que podem refletir tanto em atrasos na fabricação ou em custos inesperados, quando os defeitos são detectados, ou mesmo a perda de matéria prima, também pode oferecer risco a segurança, podendo ocasionar acidentes (MODENESI, 2012).

### **2.11.2 Definição de Soldagem**

O processo de soldagem é considerado como um método de união, porém pode ser usado para a realização de deposição de material sobre uma superfície, visando recuperação de peças desgastadas ou para aplicação de revestimentos (MODENESI, 2012).

Também pode ser utilizado para o corte de peças metálicas, onde os aspectos térmicos destas operações de recobrimento e corte são bastante semelhantes (MODENESI, 2012).

Considera-se o processo de soldagem como “a operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas”, ressaltando que não apenas os metais são soldados e que se pode realizar solda sem a necessidade de fusão dos metais (MODENESI, 2012).

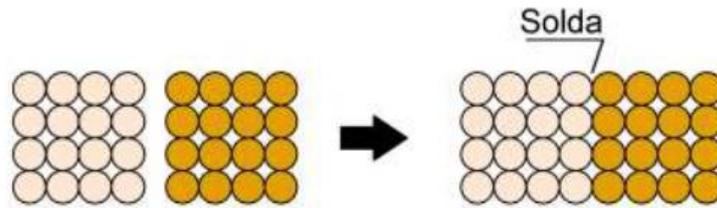
### **2.11.3 Escolha do metal de adição**

O metal de adição pode ser de acordo com as estruturas fabricadas a partir de suas ligas usuais, porém alguns fatores influenciam na escolha do metal de adição, como por exemplo, a composição química do metal de base, a geometria da junta, a diluição, resistência mecânica e ductibilidade do metal de solda, tendência a fissuramento a quente, resistência a corrosão, comportamento da solda em temperaturas elevadas, fluidez do metal de solda, entre outras (ALCAN, [s.d.]).

### **2.11.4 Formação da junta soldada**

Uma peça metálica é formada por uma estrutura cristalina, onde existem átomos localizados em um arranjo espacial distinto. Estes átomos são cercados por um número de vizinhos mais próximos, onde a distância entre si, garante uma energia mínima do sistema, tendendo a não promover nenhuma ligação entre átomos extras, mas na superfície os átomos estão ligados a um número menos de vizinhos, possuindo um maior número de energia do que os átomos no seu interior. Esta energia pode diminuir com a interação dos átomos da superfície com outros, assim podemos deduzir que quando duas peças são aproximadas os átomos tendem a interagir, promovendo ligações permanentes, conforme é observado na Figura 10 (MODENESI, 2012).

Figura 10 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças



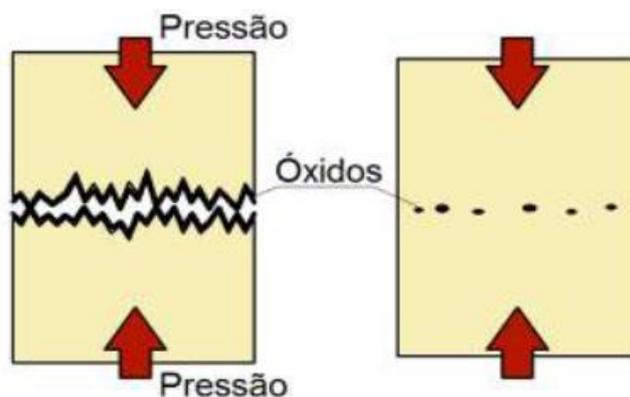
Fonte: MODENESI, 2012

Porém isto não ocorre na junção metálica, precisando assim de condições especiais, pois existem obstáculos que impedem uma aproximação efetiva das superfícies (MODENESI, 2012).

São utilizados dois modos para realizar a soldagem, originando dois grandes grupos de processos de soldagem:

- **Processos de soldagem por pressão:** ocorre devido a aplicação de pressões elevadas de forma plástica nas superfícies metálicas, promovendo a aproximação atômica de acordo com a Figura 11 (MODENESI, 2012).

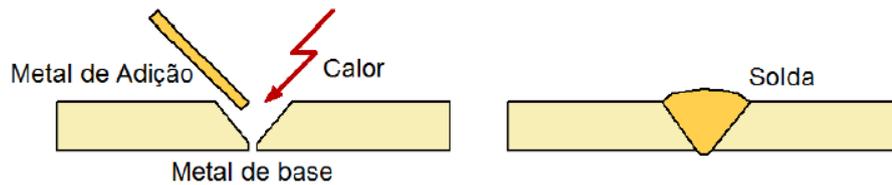
Figura 11 - Soldagem por pressão



Fonte: MODENESI, 2012

- **Processos de soldagem por fusão:** ocorre com a aplicação de calor em uma região localizada, realizando a fusão dos metais e metal de adição, produzindo uma ligação pela solidificação do metal fundido mostrado na Figura 12 (MODENESI, 2012).

Figura12 - Soldagem por fusão



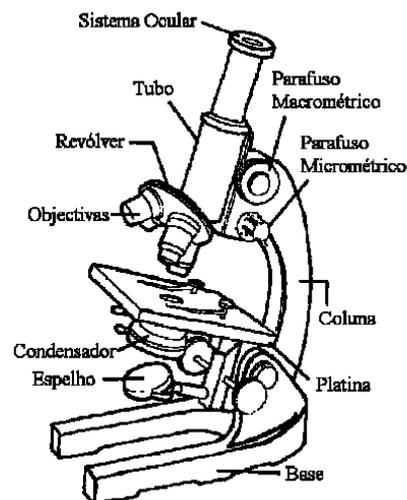
Fonte: MODENESI, 2012

## 2.12 METALOGRAFIA

A metalografia tem como objetivo revelar a intimidade estrutural dos materiais, ou seja, analisar a estrutura que o mesmo se encontra, podendo descobrir a causa raiz de algum defeito que possa acontecer na utilização de determinado metal, e essa análise pode ser micrográfica ou macrográfica (ROHDE, 2010).

Existem várias maneiras de se observar uma microestrutura, e na metalografia a mais utilizada é a óptica, conforme Figura 13 (COLPAERT, 2008).

Figura 13 – Microscópio Óptico



Fonte: (FERRARI, 2008)

Para que se tenha uma análise de alta qualidade é necessário que a superfície da amostra esteja livre de riscos e impurezas, que possam atrapalhar ou confundir a visualização do observador (COLPAERT, 2008).

O corpo de prova que será analisado tem de estar nas dimensões especificadas, e pode estar embutido ou não (ROHDE, 2010).

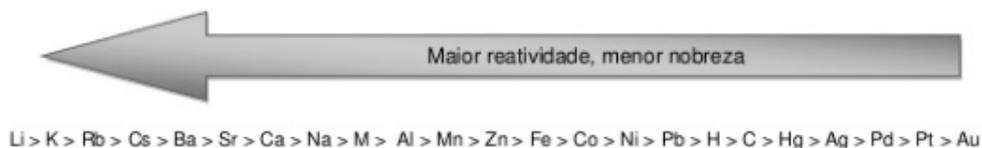
O processo metalográfico atende as seguintes etapas:

- Corte da amostra na dimensão específica para o teste;
- Embutimento á quente ou a frio;
- Lixamento e polimento;
- Ataque químico;
- Análise em microscopia óptica (ROHDE, 2010).

### 2.13 ÁCIDO CLORÍDRICO EM METAIS

Os metais apresentam uma série eletroquímica, onde pode ser chamada de “fila de reatividade química” ou “escala de nobreza”. Os metais se encontram em ordem decrescente da reatividade conforme ilustra a Figura 14. Essa ordem decrescente de reatividade significa uma ordem crescente de nobreza, ou seja, quanto mais reativo o metal for, menos nobre será (MIRON et al. 2013).

Figura 14 – Escala de reatividade dos metais



Fonte: MIRON et al. 2013)

Na reação de ácido clorídrico com determinado metal acontece a liberação do gás Hidrogênio, ou seja, só ocorre o deslocamento do Hidrogênio, caso o material metálico seja mais reativo do que ele (MIRON et al. 2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Foi utilizada para a realização desse trabalho uma chapa de alumínio da liga AA 5083 fornecidos pela empresa XXXX, e quatro corpos de prova já soldados foram cortadas nas dimensões 60 mm x 15 mm x 5 mm para a realização dos testes. A liga é composta por: Si (0,40%), Fe (0,40%), Cu (0,10%), Mn (0,40 – 1,00%), Mg (4,00 – 4,9%), Cr (0,05 – 0,25%), Zn (0,25%), Ti (0,15%), Al (96,00 – 99,00%). Todos os procedimentos e equipamentos utilizados para a realização desse trabalho foram nas dependências da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba.

#### 3.2 MÉTODOS

Conforme já citado anteriormente quatro corpos de prova foram cortadas nas dimensões 60 mm x 15 mm x 5 mm conforme mostrado na Figura 15, dois deles foram para o teste corrosivo e foram pesados anteriormente conforme ilustra a Tabela 3, com o objetivo de realizar a comparação das amostras com e sem tratamento térmico de sensitização.

Duas amostras sofreram o tratamento térmico de sensitização, onde uma realizou a perda de massa e a outra a análise da microestrutura, o mesmo aconteceu com as outras duas amostras que não sofreram a sensitização.

Figura 15 – Corpos de prova da liga AA 5083



Fonte: Os autores

Tabela 3 – Pesos iniciais das amostras que serão submetidas ao teste corrosivo em ácido clorídrico

<b>Pesagem Inicial das Amostras</b>	
Corpo de Prova	Peso (g)
Amostra Não Sensitizada	7, 8856
Amostra Sensitizada	8, 2622

Fonte: Os autores

### 3.2.1 Tratamento Térmico de Sensitização

Duas amostras foram selecionadas para a realização do tratamento térmico de sensitização, onde ficaram dentro de um forno mufla na temperatura entre 60°C e 180° C por 72 horas, mostrados na Figura 16.

Figura 16 – Tratamento térmico de sensitização entre 60° e 180°C por 72 horas no forno mufla



Fonte: Os autores

### 3.2.2 Teste corrosivo em Ácido Clorídrico

Foi realizado o teste corrosivo em ácido clorídrico com concentração de 50% por um tempo de 24 horas em duas amostras, uma sem e outra com tratamento térmico de sensitização, utilizando dois béqueres tampados com 80 ml da solução de ácido clorídrico (concentração de 50%) e água destilada. Em cada recipiente foi colocada uma dessas amostras citadas anteriormente, conforme mostrado na Figura 17. Antes do início do teste corrosivo em ácido clorídrico foi realizada uma decapagem das amostras, evitando que qualquer impureza indesejável iniba algum resultado. Essa decapagem foi realizada seguindo as etapas de:

- Limpeza das amostras com solução de soda caustica com concentração de 5% por 1 minuto a 80° C;
- Lavagem em água corrente;
- Imersão da amostra em ácido nítrico por 30 segundos;
- Lavagem em água corrente e secagem.

Figura 17 – Teste em ácido clorídrico com concentração de 50% por 24 horas



Fonte: Os autores

Após 24 horas do teste corrosivo em ácido clorídrico, as duas amostras foram retiradas dos béqueres e rapidamente lavadas com água corrente. Posteriormente as amostras foram escovadas seguindo um padrão (20 escovações), até que toda camada de óxido solta se desprendesse do metal. Logo após esse processo, as amostras foram novamente pesadas para analisar a perda de massa. A cada ciclo de escovação as amostras eram pesadas, até haver uma estabilização de peso, tendo assim uma garantia de que toda camada de óxido foi removida.

### 3.2.3 Preparação Metalográfica

As outras duas amostras (uma com e outra sem tratamento de sensibilização) que não sofreram o ataque corrosivo em ácido clorídrico foram levadas ao laboratório de metalografia onde se realizou a análise microestrutural. As amostras foram cortadas nas dimensões de 6,25 mm x 25 mm, e sua preparação atendeu os seguintes processos:

#### 3.2.3.1 Embutimento

As amostras foram embutidas, a fim de que se tenha uma superfície que facilite os procedimentos metalográficos, de acordo com a Figura 18.

Figura 18 – Amostrada embutida á quente por baquelite



Fonte: Os autores

### 3.2.3.2 Lixamento e Polimento

Para a realização do lixamento as amostras se submeteram á lixas circulares rotativas com granulometrias de: #180, #240, #320, #480, #600, #1000, #1200, #1500 e #2000.

No processo de polimento das amostras foi utilizado uma politriz circular com um pano específico de polimento, e como agente polidor utilizou-se Sílica Coloidal com 0,05 µm. O processo de polimento tem de garantir que a amostra esteja livre de riscos.

### 3.2.3.3 Ataque Químico

Após o lixamento e polimento, a amostra foi submetida ao ataque químico, onde objetivo é revelar a microestrutura. Esse ataque químico foi realizado na imersão da amostra embutida em Ácido Fosfórico ( $H_3PO_4$ ) com concentração de 40% diluída em água destilada, por três minutos com agitação constante.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PERDAS DE MASSA

Após o teste corrosivo em ácido clorídrico as amostras foram novamente pesadas, analisando a perda de massa que as mesmas tiveram, a fim de comparar com o peso inicial como é ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação da Perda de Massa das amostras

<b>Comparação de peso inicial e final</b>			
Corpo de Prova	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Porcentagem de Perda
Amostra Não Sensitizada	7,8856	7,7444	1,79%
Amostra Sensitizada	8,2622	7,0907	14,18%

Fonte: Os autores

A amostra que obteve uma maior perda de massa foi a que sofreu o tratamento térmico de sensitização, que pode ser explicado pelo mecanismo de corrosão intergranular. O tratamento térmico de sensitização provoca a precipitação do composto  $Mg_5Al_8$  (fase  $\beta$ ) em rede contínua dos contornos de grão, onde esse composto se comporta anodicamente.

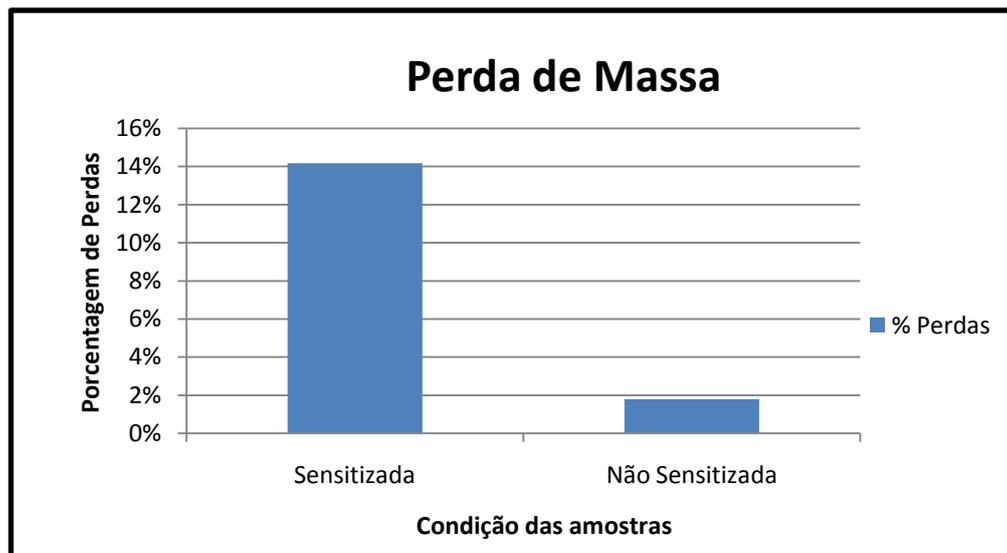
A matriz metálica se torna uma região catódica em relação ao precipitado e a presença do ácido clorídrico (eletrólito) forma o fechamento de uma pilha, iniciando o processo de corrosão intergranular.

Podemos perceber que a amostra que não sofreu o tratamento térmico de sensitização praticamente não perdeu massa, ou seja, isso é explicado pelo fato do composto  $Mg_5Al_8$  permanecer em solução sólida na matriz metálica e não se precipitar em rede contínua dos contornos de grão.

#### 4.1.1 Representação Gráfica

Com o intuito de estabelecer um melhor entendimento sobre a perda de massa das amostras, foi ilustrado no Gráfico 1 um comparativo de porcentagem de perda entre as mesmas.

Gráfico 1 – Comparação da Perda de Massa das amostras em Porcentagem



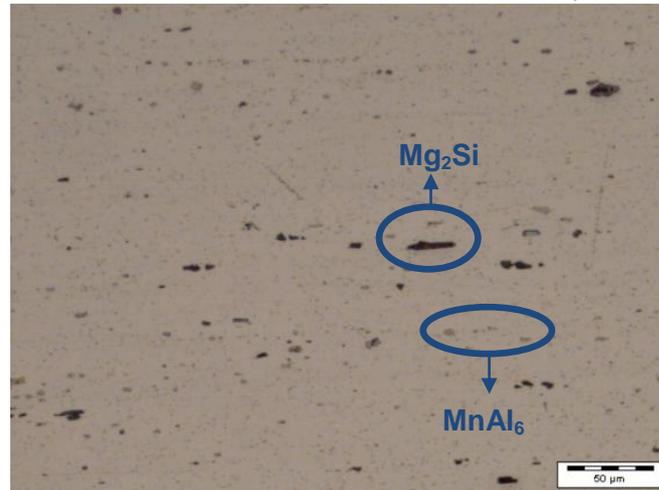
Fonte: Os autores

## 4.2 ANÁLISE METALOGRAFICA

Para a realização da análise metalográfica, foram tiradas fotografias das microestruturas das quatro amostras, comparando os mecanismos que ocorrem microestruturalmente antes e após o ataque corrosivo em ácido clorídrico com e sem tratamento de sensibilização. A fase  $\beta$  aparece no interior do grão nas amostras não sensibilizadas e precipitada em rede contínua dos contornos de grãos nas amostras sensibilizadas.

### 4.2.1 Microestrutura da Liga na condição Laminado

A microestrutura da liga AA5083 contém uma fase clara  $MnAl_6$  e uma fase escura  $Mg_2Si$  ilustrado na Figura 19.

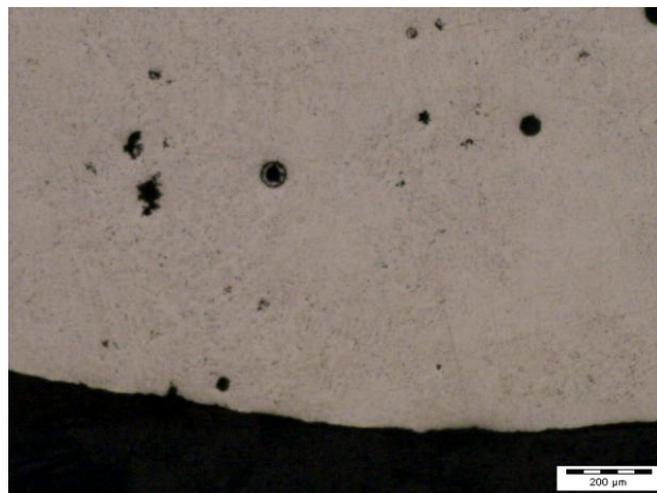


Fonte: Os autores

#### 4.2.2 Microestrutura da Solda sem Tratamento Térmico de Sensitização

A microestrutura da solda sem tratamento térmico de sensitização apresenta algumas porosidades e nenhum elemento de liga em evidência, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Região da solda sem tratamento de sensitização com aumento de 50x

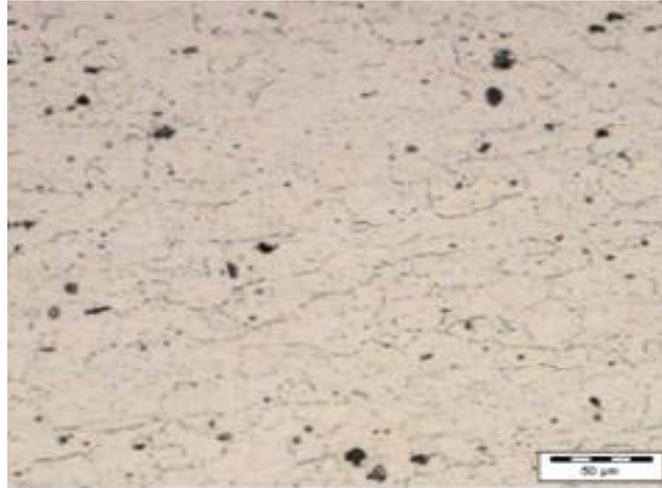


Fonte: Os autores

#### 4.2.3 Microestrutura pós-ataque químico nas amostras com e sem sensitização que não sofreram o teste corrosivo com ácido clorídrico

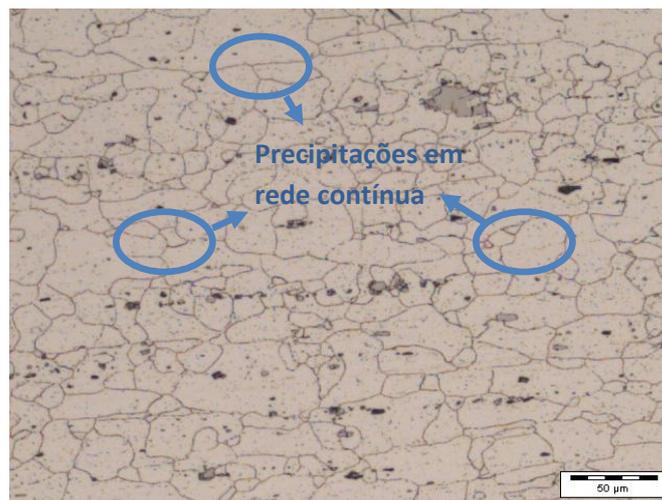
Após a realização do ataque químico com ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) com concentração de 40% diluída em água destilada, por três minutos com agitação constante se revela a fase  $\beta$  no interior do grão na amostra que não sofreu o tratamento térmico de sensitização, mostrado na Figura 21. Porém na amostra que sofreu a sensitização se percebe essa mesma fase precipitada em rede contínua de contornos de grão, conforme mostra a Figura 22.

Figura 21 – Microestrutura do metal não sensitizado com aumento de 200x



Fonte: Os autores

Figura 22 – Microestrutura do metal sensitizado com aumento de 200x



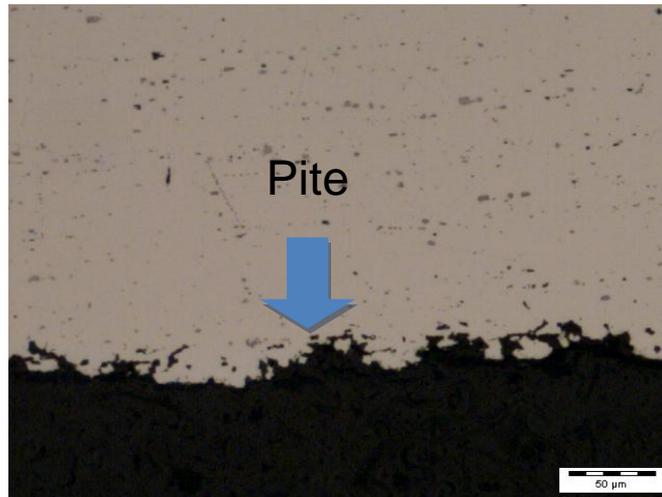
Fonte: Os autores

#### 4.2.4 Análise superficial das amostras com e sem sensitização após o teste corrosivo em ácido clorídrico

Percebe-se na amostra que não sofreu a sensitização, que após o teste corrosivo em ácido clorídrico que sua superfície aparece com uma estrutura quase que intacta, sem alterações morfológicas, ou seja, sem nenhum indício do mecanismo de corrosão intergranular, e sim com o aparecimento de alguns pites como é ilustrado na Figura 23.

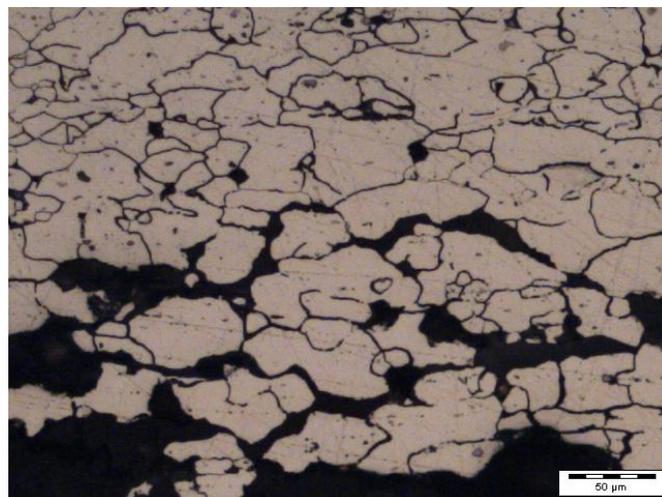
Em contrapartida, a amostra que sofreu a sensitização teve sua morfologia toda modificada após o teste corrosivo em ácido clorídrico, ou seja, apresenta uma corrosão acentuada, com grãos se desprendendo da matriz, indicando que a mesma sofreu a corrosão intergranular, conforme mostra a Figura 24.

Figura 23 – Microestrutura superficial da amostra não sensibilizada após o teste corrosivo com aumento de 200x



Fonte: Os autores

Figura 24 – Microestrutura superficial da amostra sensibilizada após o teste corrosivo com aumento de 200x



Fonte: Os autores

#### 4.2.5 Influência da solda na microestrutura do metal na condição laminada e polida

De acordo com a Figura 25 é possível perceber que o calor e tempo exercido pelo processo de soldagem não é suficiente para precipitar a fase  $\beta$  na ZTA (Zona termicamente afetada) do metal. A liga AA 5083 na condição laminada quando soldada pode ser usada, por exemplo, como silo de armazenamento de ácido clorídrico em indústria química ou de transportes, que não ocorrerá o problema de corrosão intergranular.

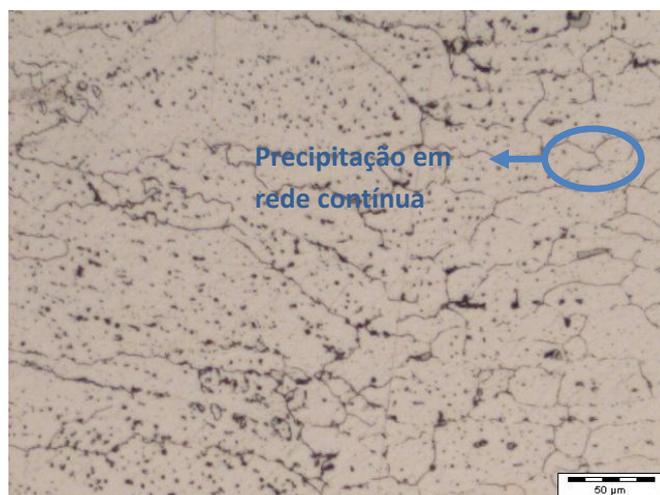
Figura 25 – Aumento em 200x da microestrutura da ZTA da amostra não sensitizada sem teste corrosivo e ataque químico com  $H_3PO_4$



Fonte: Os autores

Através da Figura 26, com um aumento em 200x, pode se observar na ZTA da amostra que sofreu a sensitização que ocorre o mecanismo de corrosão intergranular, deixando evidente que esse mecanismo só acontece quando o material é deixado em ambientes com alta temperatura e por tempos prolongados, onde o processo de soldagem se torna insuficiente para que isso aconteça.

Figura 26 – Aumento em 200x da microestrutura da ZTA da amostra sensitizada sem teste corrosivo e ataque químico com  $H_3PO_4$



Fonte: Os autores

## 5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o tratamento de sensitização precipita a fase  $\beta$  também conhecida como  $Mg_5Al_8$  em rede contínua nos contornos de grão, deixando-a susceptível a corrosão intergranular, que na presença do ácido clorídrico se forma uma pilha de corrosão com essa fase, que atua anodicamente e a matriz metálica catodicamente, ocorrendo em pouco tempo a deterioração do material.

Pode-se concluir também que o processo de soldagem não influencia a microestrutura da ZTA do metal, ou seja, o calor e tempo gerados são insuficientes para precipitar a fase  $\beta$ , não deixando susceptível a corrosão intergranular. Com base nessas informações, é comprovado que a liga AA 5083 (Al-Mg) na condição laminada pode ser usada em ambientes altamente agressivos, pois sua microestrutura não sofre alterações, não gerando riscos de danos futuros, mesmo que a mesma esteja na condição soldada.

## REFERÊNCIAS

ABAL. **Automotivo e transportes**. Artigo. São Paulo. ABAL, 2017. < Disponível em: <http://abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/> > Acessado em: 30/06/2017.

ABAL. **Construção Civil**. Artigo. São Paulo. ABAL, 2017. < Disponível em: <http://abal.org.br/aplicacoes/construcao-civil/>> Acessado em: 30/06/2017.

ABAL. **Fundamento e Aplicações do Alumínio**. 1ª ed. São Paulo: ABAL, 2007.

ABAL. **Guia Técnico do Alumínio: Compatibilidade do alumínio e suas ligas com alimentos e produtos químicos**. Vol.7. 1ª ed. São Paulo: ABAL, 2003.

ABAL. **Guia Técnico do Alumínio: Laminação**. 2ª ed. São Paulo: ABAL, 2004.

ABAL. **Guia Técnico do Alumínio: Nomenclatura do alumínio e suas ligas**. 2ª ed. São Paulo: ABAL, 2011.

ABAL. **Maquinas e Equipamentos**. Artigo. São Paulo. ABAL, 2017. < Disponível em: <http://abal.org.br/aplicacoes/maquinas-e-equipamentos/>> Acessado em: 30/06/2017.

ALCAN. **Manual de Soldagem: Classificação das Ligas de Alumínio**. Manual. Alcan Alumínio do Brasil S/A. [s.l.]. [s.d.].

ALCAN. **Manual de Soldagem: Metal de adição**. Manual. Alcan Alumínio do Brasil S/A. [s.l.]. [s.d.].

COELHO, Pedro. **Diferentes Tipos e Formas de Corrosão**. Artigo. São Paulo. 2015 <Disponível em <http://www.engquimicasantosp.com.br/2015/06/diferentes-tipos-e-formas-de-corrosao.html#ixzz4K3jxHj7D>> Acessado em 29/11/2016.

COLPAERT, Humbertus. Técnica Metalográfica - Micrografia. In: **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo, 2008. Cap. 5. p. 68-81.

ESAF; IBRAP. Refusão do Alumínio. Artigo. IBRAP. 2017. < Disponível em: <http://www.ibrap.ind.br/refusao/>> Acessado em: 30/06/2017

FERRARI, Ricardo Bulcão. **Caracterização de liga metálica a base de alumínio - magnésio obtido por método convencional após tratamentos termomecânicos**

**visando estruturas microcristalinas.** 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Nuclear, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FOGAÇA, Jennifer. **Ligas Metálicas.** Artigo. Manual da Química. 2014 < Disponível em: <http://manualdaquimica.uol.com.br/quimica-geral/ligas-metalicas.htm>>. Acessado em: 17/11/2016

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

GODEFROID, L.B. **Fadiga e Fratura de Materiais Metálicos.** Apostila. UFOP. Ouro Preto, 2003.

HYDRO. **Como o Alumínio é produzido.** Artigo. Hydro. São Paulo. 2016. <Disponível em: <http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Sobre-o-aluminio/como-aluminio-e-produzido/>>

MIRON, E.M.; CÉSAR, G.; CARVALHO, G.P.; AMARAL, J.; FUGIMOTO, M.P. **REAÇÃO COM METAIS.** Relatório. UNIMEP. Santa Barbara D'Oeste, 2013.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem;** Métodos de união dos metais. Manual. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem;** Definição de Soldagem. Manual. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem;** Formação de junta soldada. Manual. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

MOREIRA, Marcelo F. **Contornos de Grão.** Artigo. Dalmolim [s.d]. [s.l]. < Disponível em: <http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/defeitos.pdf>> Acessado em 24/11/2016

PATINI, Gabriel. **Revista Alumínio:** Alumínio no DNA. Revista. 47ª ed. São Paulo: CECOM, 2016.

PINTO, Daniel Fraga. **Comportamento em corrosão sob tensão de um Aço Inoxidável Ferrítico AISI 444 Soldado com Aço Inoxidável Austenítico AISI 316LSi, em Meios contendo Cloretos.** Artigo. REDEMAT. Ouro Preto, 2006.

ROHDE, Regis Almir. **METALOGRAFIA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS**. Artigo. URI. Santo Ângelo, 2010.

SANTOS, Ewerton Felipe dos; NEVES, Robson Alexandre Antonio. **Estudo da perda de massa da liga de alumínio AA 5083 sensitizada e não sensitizada em banho de ácido nítrico em diferentes concentrações**. Artigo. FATEC. Pindamonhangaba, 2015.

SARTORI, Alexandre. **Ligas de Alumínio: Características – Classificação – Aplicação**. Apostila. FATEC. Pindamonhangaba, 2004.

SCIENTIAPOTENTIAPLUS. **Corrosão**. Artigo. [s.l.]. [s.d.] <Disponível em <https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/corrosao>> Acessado em 29/11/2016

SENAI. **Conformação Mecânica: Laminação do Alumínio**. Apostila. Osasco. 2002

VIANA, Carlos Sérgio da Costa; MELLO, Sérgio Ricardo; SOUZA, Camila Oliveira de.; CITELI, Natalie Lacerda. **Seleção de materiais alumínio e suas ligas**. Artigo. Universidade Federal Fluminense (EEIMVR). 2009. <Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAUAZkAF/aluminio-suas-ligas?part=5> >. Acessado em: 17/11/2016