

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**ESTUDO DA CORROSÃO INTERGRANULAR
EM JUNTA SOLDADA EM LIGA DE Al-Mg
AA5083 APÓS SENSITIZAÇÃO EM BANHO DE
ÁCIDO SULFÚRICO DILUÍDO EM 80%**

Eliandro César Pereira
Nicolas Mateus Figueira Manara

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

Prof.Msc. Orientador: Alexandre Sartóri

Pindamonhangaba - SP
2017

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**ESTUDO DA CORROSÃO INTERGRANULAR
EM JUNTA SOLDADA EM LIGA DE Al-Mg
AA5083 APÓS SENSITIZAÇÃO EM BANHO DE
ÁCIDO SULFÚRICO DILUÍDO EM 80%**

Eliandro César Pereira
Nicolas Mateus Figueira Manara

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

Área de Concentração: Materiais
Prof.Msc. Orientador: Alexandre Sartóri

Pindamonhangaba - SP
2017

P436e Pereira, Eliandro César.

Estudo da corrosão intergranular em junta soldada em liga de Al-Mg AA5083 após sensibilização em banho de ácido sulfúrico diluído em 80% / Eliandro César Pereira; Nicolas Mateus Figueira Manara / FATEC Pindamonhangaba, 2017.
53f.; il.

Orientador: Professor Msc. Alexandre Sartori
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2017

1. Corrosão intergranular. 2. Sensibilização. 3. Soldagem.
I. Pereira, Eliandro César. II. Manara, Nicolas Mateus Figueira.
III. Sartori, Alexandre. IV. Título.

CDD 620

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**“ESTUDO DA CORROSÃO INTERGRANULAR EM
JUNTA SOLDADA EM LIGA DE AL-MG AA5083
APÓS SENSITIZAÇÃO EM BANHO DE ÁCIDO
SULFÚRICO DILUÍDO EM 80%”.**

**NÍCOLAS MATEUS FIGUEIRA MANARA
ELIANDRO CÉSAR PEREIRA**

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

Comissão Examinadora

Orientadora – Prof. Me. Alexandre Sartori

Membro – Prof. Amir Rivaroli Junior

Membro – Sr. João Maurício Godoy

Pindamonhangaba, 15 de agosto de 2017.

DEDICATÓRIA

Nicolas Mateus Figueira Manara

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pois se não fosse por ele não teria chegado aonde cheguei, para meus avôs, em especial meu avô Alcides Osmar Manara, por todo o apoio que me deu durante estes 3 anos de faculdade, para meus irmãos, minha mãe, meus familiares e amigos que me apoiaram e não me deixaram desistir em nenhum momento.

DEDICATÓRIA

Eliandro César Pereira

Dedico este trabalho aos familiares e amigos que sempre estiveram do meu lado quando precisei, me motivando e dando apoio em todas as minhas decisões.

Dedico principalmente aos meus pais Júlio Gabriel Pereira e Cecília Alves Freitas Pereira que me deram o suporte necessário para que eu conseguisse concluir mais essa etapa da minha vida.

Dedico a Deus por ter me dado saúde, sabedoria e forças para poder superar todos os obstáculos.

Dedico as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente, mas principalmente aquelas que acreditaram em nós e continuaram a nos incentivar e aos colegas que já não estão mais entre nós.

AGRADECIMENTOS

Nicolas Mateus Figueira Manara

Primeiramente a Deus por ter me dado esta incrível oportunidade de poder estudar e concluir um curso de nível superior nesta renomada faculdade.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Aos meus avós Alcides Osmar Manara e Sônia Figueira Manara, que proporcionaram toda condição e apoio necessário para a conclusão deste curso, e aos meus irmãos que sempre estão do meu lado.

Ao professor Alexandre Sartóri, pelo inestimável apoio na orientação e de proporcionar esta oportunidade de realizar este magnífico trabalho.

À professora Ana Beatriz Moreira Abrahão, por ter me ajudado com a monitoria no laboratório de química, onde pude aprender muito.

Aos monitores do laboratório de Metalografia pelo apoio durante todo o procedimento para a realização do trabalho.

Aos colegas de classe, com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de conviver e de aprender muito com eles.

AGRADECIMENTOS

Eliandro César Pereira

Aos amigos e colegas que sempre nos ajudaram sem pedir nada em troca, isso fez toda a diferença.

Ao Prof.Msc. Alexandre Sartóri que nos deu essa oportunidade e acreditou no nosso trabalho.

Aos monitores que estiveram de prontidão e expectativa positiva com o trabalho.

Aos meus pais e familiares que se preocupavam em saber se tudo sobre o trabalho estava indo bem.

Aos funcionários em geral da Fatec Pindamonhangaba.

MANARA, Nicolas M.F.; PEREIRA, Eliandro César. **Estudo da corrosão intergranular em junta soldada em liga de Al-Mg AA5083 após sensitização em banho de ácido sulfúrico diluído em 80%**. 2017. 51p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2017.

RESUMO

Para este trabalho, foi escolhida esta liga para avaliar o material quando o mesmo é submetido a um processo de corrosão após sofrer um tratamento conhecido como sensitização. Segundo Sartóri (2016), a sensitização acontece quando a fase β (Mg_5Al_8) se precipitará em rede contínua em contorno de grão no material, tornando-o menos resistente a corrosão. Com a sensitização, o material ficou mais susceptível a sofrer o mecanismo de corrosão intergranular que segundo Sartori (2016), é também conhecida como um ataque seletivo em torno do contorno do grão. A corrosão intergranular ocorreu devido a fase β que foi precipitada após o material passar pelo processo de sensitização, que aconteceu depois de o material ficar em um forno por um tempo prolongado a uma temperatura que pode variar de 60°C até aproximadamente 200°C . Como foco para estudo, foi escolhida a da liga AA5083 soldada, para ser analisada se a soldagem do material irá interferir na microestrutura causando a sensitização do material. Para que não ocorra a sensitização, o material deve ser resfriado rapidamente quando chega perto da temperatura em que ocorre a sensitização, que está por volta de 200°C até aproximadamente 60°C , as amostras foram submetidas ao processo de sensitização permanecendo dentro de um forno em uma temperatura de 180°C por 72 horas. Após a sensitização, os corpos de prova na condição sensitizada e não sensitizada foram submetidos a um banho de ácido sulfúrico com uma concentração de 80%, na qual ficaram imersos na solução por 24 horas. Posteriormente os corpos de prova foram limpos e pesados para que fosse feito uma avaliação da perda de massa após a corrosão. Ainda após a limpeza os corpos de prova foram submetidos a uma análise metalográfica a fim de avaliar a corrosão intergranular. Com a avaliação do material foram obtidos excelentes resultados e pode-se perceber que o ácido sulfúrico nessa concentração e na temperatura ambiente não causa uma corrosão intergranular muito severa na amostra sensitizada, enquanto na amostra não sensitizada causou corrosão por pite. Com estes resultados chegamos à conclusão de que a soldagem nesta liga não irá causar a sensitização no material.

Palavras-chave: corrosão intergranular, sensitização, soldagem.

MANARA, Nicolas M.F .; PEREIRA, Eliandro César. **Study of intergranular corrosion in alloy welded joint of Al-Mg AA5083 after sensitization in a bath of sulfuric acid diluted in 80%** .2017. 51p. Graduation Work (Course of Metallurgical Processes). Faculty of Technology of Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2017.

ABSTRACT

For this work, this alloy was chosen to evaluate the material when it is subjected to a corrosion process after undergoing a treatment known as sensitization. According to Sartóri (2016), the sensitization happens when the phase β (Mg_5Al_8) will precipitate in continuous network in contour of grain in the material, making it less resistant to corrosion. With the sensitization, the material was more susceptible to suffer the intergranular corrosion mechanism that according to Sartori (2016), is also known as a selective attack around the contour of the grain. Intergranular corrosion occurred due to the β phase which was precipitated after the material passed through the sensitization process which occurred after the material is left in an oven for a prolonged time at a temperature ranging from 60°C to about 200°C. As a focus for the study, the welded AA5083 alloy was chosen to be analyzed if the welding of the material will interfere with the microstructure causing the material to be sensitized. In order to avoid sensitization, the material should be cooled rapidly when it comes close to the temperature at which the sensitization occurs, which is around 200°C to approximately 60°C, the samples were subjected to the sensitization process remaining within a oven at a temperature of 180°C for 72 hours. After the sensitization, the specimens in the sensitized and non-sensitized conditions were submitted to a sulfuric acid bath with a concentration of 80%, in which they were immersed in the solution for a time of 24 hours. Subsequently the specimens were cleaned and weighed to evaluate the loss of mass after corrosion. After cleaning, the specimens were subjected to a metallographic analysis to evaluate intergranular corrosion. With the evaluation of the material excellent results were obtained and it can be seen that the sulfuric acid at this concentration and the ambient temperature does not cause a very severe intergranular corrosion in the sensitized sample, while in the non-sensitized sample it caused pitting corrosion. With these results we came to the conclusion that welding in this alloy will not cause the sensitization in the material.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas típicas do alumínio	20
Tabela 2 - Pesagem Inicial e Final das Amostras	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Perda de massa em % das amostras	44
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mineração da bauxita exemplificada	22
Figura 2: Processo bayer	23
Figura 3: Explicação processo bayer	23
Figura 4: Tipos de laminadores	25
Figura 5: Laminação a quente	26
Figura 6: Laminação a frio	27
Figura 7: Forno de reciclagem alumínio.....	29
Figura 8: Processo MIG no alumínio	37
Figura 9: Soldagem TIG no alumínio	38
Figura 10: Amostras antes do processo de sensitização	40
Figura 11: Forno para a sensitização	41
Figura 12: Amostra sensitizada	42
Figura 13: Amostra Sensitizada após ataque com H_3PO_4 40%	45
Figura 14: Amostra Não Sensitizada após ataque com H_3PO_4 40%	45
Figura 15: Mostra o cordão de solda da amostra não sensitizada após teste de corrosão em ácido sulfúrico com aumento de 100x	46
Figura 16: Mostra o metal de base da amostra não sensitizada após teste de corrosão em ácido sulfúrico com aumento de 100x	46
Figura 17: Amostra não sensitizada após ataque com ácido fosfórico. Zona entre metal de base e ZTA 200x de aumento	47
Figura 18: Mostra pite formado na região da solda da amostra sensitizada após teste de corrosão com ácido sulfúrico com aumento de 200x	47
Figura 19: Leve ataque superficial no metal base após teste de corrosão em ácido sulfúrico com aumento de 200x	48
Figura 20 Amostra sensitizada após ataque ácido fosfórico metal de base. Aumento 200x ...	48
Figura 21 Amostra sensitizada após ataque ácido fosfórico metal de base. Aumento 500x ...	49
Figura 22 Região da solda após teste de corrosão em ácido sulfúrico e ataque com H_3PO_4 40%. Aumento de 200x	49
Figura 23 Região da solda após teste de corrosão em ácido sulfúrico e ataque com H_3PO_4 40%. Aumento de 500x	50
Figura 24 Formação de pite na região da solda após teste de corrosão em ácido sulfúrico e ataque com H_3PO_4 40%. Aumento de 500x	50

SUMÁRIO

1	Introdução	17
2	Revisão bibliográfica	18
2.1	O alumínio	18
2.2	Propriedades físicas e químicas do alumínio	18
2.3	Principal utilização do alumínio	20
2.4	Obtenção do alumínio.....	21
2.4.1	Mineração	21
2.4.2	Refinaria	22
2.4.3	Processo bayer	24
2.4.4	Redução	24
2.5	Laminação do alumínio	24
2.5.1	Tipos de laminadores.....	25
2.5.2	Laminação a quente	26
2.5.3	Laminação contínua.....	27
2.5.4	Laminação a frio	27
2.5.5	Laminação de folhas	28
2.5.6	Reciclagem do alumínio	28
2.6	Alumínios da série 5XXX	29
2.7	Alumínio AA5083	30
2.8	Corrosão	31
2.9	Custos	32
2.10	Casos benéficos de corrosão.....	32
2.11	Formas de corrosão.....	33
2.12	Soldagem	34
2.13	Soldabilidade	35
2.14	Metalurgia da soldagem.....	35
2.14.1	Zona termicamente afetada.....	35
2.15	Soldagem em materiais não ferrosos	36
2.16	Soldagem do alumínio e suas ligas.....	36
2.17	Soldagem GMAW e GTAW das ligas de alumínio	36
2.18	Processo de solda MIG no alumínio (Metal Inert Gas)	37
2.19	Processo de solda TIG no alumínio (Tungsten Inert Gas)	38

2.20 Cordão de solda	38
2.21 Zona termicamente afetada.....	39
3 Materiais e métodos.....	40
3.1 Materiais	40
3.2 Métodos	40
3.2.1 Preparação das amostras.....	40
3.2.2 Sensitização	41
3.2.3 Corte das amostras após sensitização	41
3.2.4 Limpeza inicial das amostras.....	42
3.2.5 Ensaio de corrosão.....	42
3.2.6 Limpeza e metalografia das amostras.....	43
4 Resultados e discussões	44
5 Conclusão	51
5.1 Sugestão para trabalhos futuros	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE ABREVIACOES

AA – Associação do Alumínio
ABAL – Associação Brasileira do Alumínio
Al – Alumínio
Al₂O₃ – xido de alumínio
β – Fase Beta
°C - Graus Centigrados
CA – Corrente Alternada
Cal – Caloria
CC – Corrente Contínua
Cm - Centímetro
Cu – Cobre
GMAW – Gas Metal Arc Welding
GTAW – Gas-Shielded Tungsten Arc Welding
HB – Hardness Brinell
H₂SO₄ – cido Sulfúrico
H₃PO₄ – cido Fosfórico
HNO₃ – cido Nítrico
IACS – International Annealed Cooper Standard
MAG – Metal Active Gas
MIG – Metal Inert Gas
Mg - Magnésio
Mn – Manganês
Mpa – Mega Pascal
NaOH – Soda Cáustica
Si – Silício
SMAW - Shielded Metal Arc Welding
TIG – Tungsten Inert Gas
Zn - Zinco
ZTA – Zona Termicamente Afetada

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é hoje um dos materiais mais utilizados no mundo, tanto na indústria alimentícia quanto na indústria automobilística, transporte e em muitas outras, devido as suas características físicas, químicas e a principal de todas, que tem um ciclo infinito de reciclagem.

Para este trabalho, foi selecionada a liga de alumínio AA5083, que tem excelentes propriedades físicas, e entre as suas características, as que mais se destacam são a sua soldabilidade e sua capacidade de resistir à corrosão em ambientes marinhos e a sua usinabilidade. Este material tem em sua composição química um teor de magnésio de 4,0 a 4,9%.

O estudo visa avaliar o comportamento deste material após sofrer a sensitização, que é um processo não benéfico para o alumínio, pois precipita uma fase conhecida como fase β (Mg_5Al_8).

Este estudo demonstra através do ensaio de corrosão o quanto a sensitização da liga de alumínio AA5083 irá afetar a resistência em ácido sulfúrico diluído em 80% para comprovar se a solda feita no material irá causar sensitização.

O objetivo deste trabalho é estudar o mecanismo de corrosão intergranular da liga AA5083 sensitizada em contato com ácido sulfúrico. A liga a ser estudada passou pelo processo de sensitização ficando em um forno com uma temperatura de 180°C pelo período de 72 horas. Após este tratamento a mesma irá ser submetida a um ensaio de corrosão, onde foi submetida a um banho em ácido sulfúrico por 24 horas. Após realizado o teste, os dados obtidos foram avaliados através da metalografia.

Este trabalho não teve como objetivo analisar os parâmetros da soldagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O ALUMÍNIO

O alumínio é um material muito utilizado devido as suas propriedades físicas e químicas. Uma de suas propriedades mais marcantes é a sua capacidade de passar por um ciclo quase eterno de reciclagem. Outras propriedades como condutibilidade elétrica, conformabilidade, dureza entre outras também são levadas em conta no momento da escolha de um excelente material para algum determinado trabalho (SARTÓRI, 2016).

A resistência mecânica do alumínio é aumentada em conformações a frio e pela formação de algumas ligas, os principais elementos utilizados para alumínio são o cobre, o magnésio, o silício, o manganês e o zinco (CALLISTER, 2008).

Algumas ligas não são tratáveis termicamente, pois elas são monofásicas e um aumento na resistência mecânica delas pode ser obtido através de endurecimento por solução sólida, já as que possuem tratamento, são resultado da formação de mais componentes. Em varias delas, o endurecimento é feito através da provocação da precipitação de dois elementos ou outros que não sejam alumínio para formar um composto intermetálico aumentando sua dureza (CALLISTER, 2008).

O alumínio é um metal extremamente viável para várias aplicações, porque além de proporcionar todos os requisitos técnicos e de poder contar com uma gama enorme de materiais e ligas, tem um custo x benefício favorável, considerando o processo como um todo (ABAL, 2003).

Este material e suas combinações possuem facilidade no seu manuseio tanto na fabricação como em processos metalúrgicos posteriores, por exemplo, ligas são soldadas para fazer reatores, trocadores de calor, caminhões-tanque, equipamentos de destilação e de processamento (ABAL, 2003).

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO ALUMÍNIO

Segundo ABAL ([s.d.]):

- **Ponto de fusão:** O alumínio possui ponto de fusão de 660°C, o que é relativamente baixo comparado ao do aço, que é da ordem de 1570°C.
- **Peso específico:** A leveza é uma das principais características do alumínio. Seu peso específico é de cerca de 2,70 g/cm³, aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre.

- **Resistência à corrosão:** O alumínio possui uma fina e invisível camada de óxido, a qual protege o metal de oxidações posteriores. Essa característica de auto-proteção dá ao alumínio uma elevada resistência à corrosão.
- **Condutibilidade elétrica:** O alumínio puro possui condutividade elétrica de 62% IACS (International Annealed Copper Standard), a qual associada à sua baixa densidade significa que um condutor de alumínio pode conduzir tanta corrente quanto um condutor de cobre que é duas vezes mais pesado e proporcionalmente mais caro.
- **Condutibilidade térmica:** O alumínio possui condutibilidade térmica 4,5 vezes maior que a do aço.
- **Refletividade:** O alumínio tem uma refletividade acima de 80%, a qual permite ampla utilização em luminárias.
- **Propriedade antimagnética:** Por não ser magnético, o alumínio é frequentemente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos. Além disso, o metal não produz faíscas, o que é uma característica muito importante para garantir sua utilização na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas, bem como em caminhões-tanque de transporte de combustíveis.
- **Característica de barreira:** O alumínio é um importante elemento de barreira à luz, é também impermeável à ação da umidade e do oxigênio, tornando a folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens.
- **Reciclagem:** A característica de ser infinitamente reciclável, sem perda de suas propriedades físico-químicas é uma das principais vantagens do alumínio.

Todas essas características apresentadas conferem ao alumínio uma extrema versatilidade. Na maioria das aplicações, duas ou mais destas características entram em jogo, por exemplo: baixo peso combinado com resistência mecânica; alta resistência à corrosão e elevada condutibilidade térmica.

Na Tabela 1, pode-se observar as propriedades físicas típicas do alumínio:

Tabela 1: Propriedades Físicas Típicas do Alumínio

Propriedades físicas típicas	Alumínio
Densidade (g/cm ³)	2,70
Temperatura de fusão (°C)	660
Módulo de elasticidade (MPa)	70000
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C);	23.10-6
Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61

Fonte: ABAL ([s.d.])

2.3 PRINCIPAL UTILIZAÇÃO DO ALUMÍNIO

Segundo ABAL ([s.d.]),

Os hábitos dos consumidores mudam com o tempo e o alumínio sempre acompanhou essas mudanças, atendendo, graças às características próprias do metal, às novas exigências da vida moderna. Isso explica a permanência do alumínio como componente ou principal matéria-prima de uma extensa relação de bens de consumo.

Da cozinha ao escritório, traduz o conceito de contemporaneidade a ambientes, permitindo a perfeita harmonização do metal com materiais diversos. E para as áreas externas ou em aplicações nas regiões litorâneas, não há dúvidas: só o alumínio oferece grande resistência à corrosão o que, no dia-a-dia, significa mais durabilidade e proteção contra intempéries.

- **Utensílios domésticos:** Painéis, assadeiras e acessórios ganham sofisticação e durabilidade ao serem fabricados em alumínio. A leveza e a durabilidade das painéis de alumínio, em especial, trazem segurança, conforto e praticidade a cozinhas industriais, restaurantes e residências.

Mas a característica mais importante, que faz das painéis de alumínio a preferida para quem cozinha, é a excelente condutibilidade térmica do metal, que distribui melhor e de maneira uniforme o calor da chama, proporcionando assim um cozimento bem mais homogêneo do alimento.

- **Móveis e decoração:** Na indústria moveleira, é a escolha certa para unir beleza, resistência e durabilidade na produção de móveis, acessórios, ferramentas, revestimentos, acabamentos, peças de decoração e luminárias.

- **Eletroeletrônicos e linha branca:** A facilidade que o alumínio tem de assumir diversas formas e peças, com beleza e excelente acabamento superficial, valorizam qualquer produto. Na indústria de refrigeração, os painéis de alumínio, na forma de evaporadores, garantem o funcionamento de geladeiras e “freezers”.
- **Artigos esportivos:** Bicicletas e aparelhos ergométricos, acessórios e equipamentos para práticas esportivas diversas ficam mais leves, duráveis e eficientes graças às características do metal.
- **Automotivo e Transportes:** O setor de transportes é o maior consumidor de alumínio no mundo. Chapas, folhas, perfis, forjados e fundidos de alumínio derivam cada vez mais soluções eficientes para essa indústria.

Graças as suas propriedades e características, o alumínio está presente em praticamente todos os sistemas e componentes utilizados na fabricação de veículos mais leves, menos poluentes e com melhor desempenho

2.4 OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO

Segundo Souza ([s.d.]), “a obtenção do alumínio é feita a partir de 3 etapas a partir do minério bauxita: mineração, refinaria e redução”.

Segundo ABAL ([s.d.]), o alumínio é obtido através da bauxita, um minério que pode ser encontrado em três principais grupos climáticos: o mediterrâneo, o tropical e o subtropical. A bauxita deve apresentar no mínimo 35% de óxido de alumínio (Al_2O_3) aproveitável para que a produção de alumínio seja economicamente viável. As reservas brasileiras de bauxita, além da ótima qualidade do minério também estão entre as maiores do mundo.

2.4.1 Mineração

Segundo ABAL ([s.d.]), o alumínio é obtido a partir da bauxita, um minério que pode ser encontrado em três principais grupos climáticos: o mediterrâneo, o tropical e o subtropical. A bauxita deve apresentar no mínimo 35% de óxido de alumínio (Al_2O_3) aproveitável para que a produção de alumínio seja economicamente viável. As reservas brasileiras de bauxita, além da ótima qualidade do minério também estão entre as maiores do mundo. Pode-se observar na Figura 1 a mineração exemplificada:

Figura 1: Mineração da bauxita exemplificada

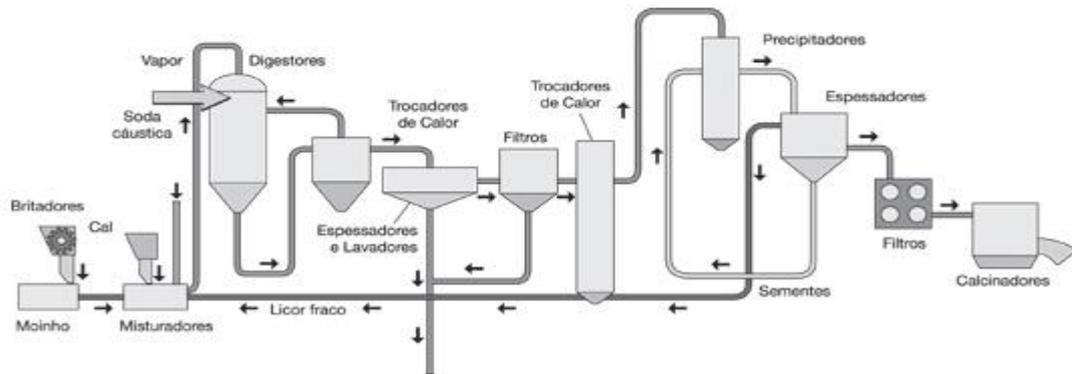


Fonte: ABAL ([s.d.]

2.4.2 Refinaria

Segundo ABAL ([s.d.]), essa fase do processo além de ser insumo para a obtenção do alumínio primário, a alumina tem diversas aplicações como a fabricação de materiais refratários, tratamento de água, uso em produtos abrasivos para polimento, como retardante de chamas, na fabricação de velas de ignição entre outros. O processo mais utilizado para obtenção de alumina é Bayer, exemplificado na Figura 2 e 3:

Figura 2: Processo Bayer



Fonte: ABAL ([s.d.])

Figura 3: Explicação Processo Bayer



Fonte: ABAL ([s.d.])

Segundo Souza ([s.d.]), nesta etapa, a alumina precisa passar por uma purificação, é então dissolvida em soda cáustica e logo após passa por uma filtração. Um pó branco de alumina pura é obtido e enviado à redução.

2.4.3 Processo Bayer

Segundo ABAL (2007), o processo químico denominado Bayer é o mais utilizado na indústria do alumínio. Neste processo, a alumina é dissolvida em soda cáustica e, posteriormente, filtrada para separar todo o material sólido, concentrando-se o filtrado para a cristalização da alumina. Ainda segundo ABAL (2007), os cristais são secados e calcinados para eliminar a água, sendo o pó branco de alumina pura enviado à redução para obtenção de alumínio, através de eletrólise, processo conhecido como Hall-Héroult.

2.4.4 Redução

Segundo Souza ([s.d.]), esta última etapa permite a obtenção de alumínio através de eletrólise. A passagem de corrente elétrica na célula eletrolítica promove a redução da alumina, decantando o alumínio metálico no fundo da célula e o oxigênio liberado reage com o ânodo de carbono, formando dióxido de carbono. Vejamos como ocorre a reação de oxirredução:

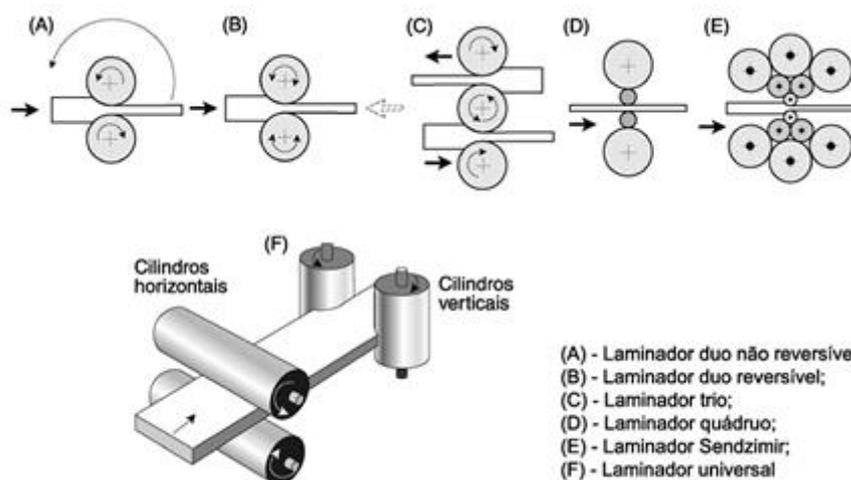
- A alumina é colocada no estado fundido em um tanque de aço revestido com carbono e esse tanque funciona como cátodo;
- Os ânodos são constituídos de bastões de carbono mergulhados na alumina fundida;
- As reações de oxirredução promovidas por esse processo originam alumínio puro no cátodo. Este, posteriormente, vai para o fundo da célula eletrolítica.

2.5 LAMINAÇÃO DO ALUMÍNIO

Segundo ABAL (2007), a laminação é um processo de transformação mecânica que consiste na redução da seção transversal do metal, por meio de compressão e de tensões cisalhantes superficiais que resultam da fricção após a passagem do material entre cilindros com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos.

Embora qualquer liga trabalhável de alumínio possa ser laminada, existem ligas que oferecem uma ampla faixa de propriedades e que podem ser laminadas com a máxima eficiência, cada qual apresentando suas características individuais, como pode ser observado na Figura 4:

Figura 4: Tipos de Laminadores



Fonte: ABAL ([s.d.])

2.5.1 Tipos de Laminadores

Segundo ABAL (2007), um laminador consiste basicamente de cilindros de trabalho e de apoio, mancais, uma carcaça chamada de “gaiola” ou quadro que serve para fixar partes e um motor para fornecer a potência necessária aos cilindros e, controle da rotação.

Devido as forças que envolvem a laminação serem muito fortes, torna-se necessário uma construção bastante rígida do mesmo, além de motores muito potentes para fornecer a potência necessária que o laminador irá precisar. O custo, portanto, de uma moderna instalação de laminação está na ordem de milhões de dólares e consome muitas horas de trabalho.

- **Laminadores Quádruos:** são dois cilindros de trabalho (superior e inferior) de menor diâmetro que entram em contato com o material agindo diretamente sobre a chapa. Os cilindros com maior diâmetro (cilindros de apoio) giram sobre os cilindros de trabalho fazendo com que se minimize a carga que será aplicada sobre a chapa laminada. É um sistema que permite que se reduza ao máximo os danos mecânicos na superfície do material laminado.
- **Laminador Duo:** a mais simples, composta por dois cilindros de eixos horizontais, colocados verticalmente um sobre o outro, podendo ou não ser reversível, porém o sentido do giro dos cilindros não pode ser invertido assim o material só poderá ser laminado em apenas uma única direção.
- **Laminadores Reversíveis:** a inversão dos cilindros permite que a laminação ocorra nos dois sentidos de passagem entre os rolos.

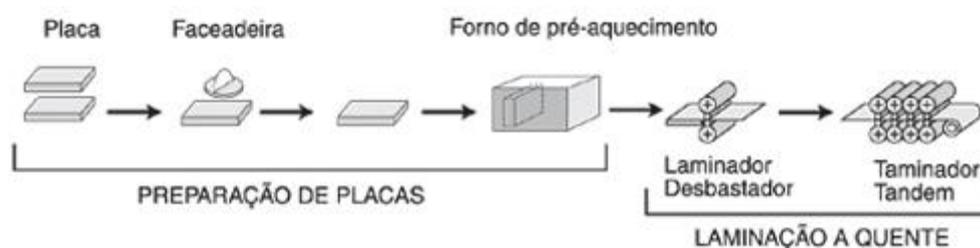
- **Laminador Trio:** é composto por três cilindros que sempre giram no mesmo sentido, sendo que o material poderá ser laminado nos dois sentidos, passando-o de uma forma alternada entre o cilindro superior e o intermediário e entre o intermediário e o inferior.
- **Laminador Universal:** dispõe de dois pares de cilindros de trabalho, com eixos verticais e horizontais.

2.5.2 Laminação a Quente

Segundo ABAL (2007), é a etapa inicial do processo de laminação na qual o material será aquecido a uma temperatura de aproximadamente 500°C, para que seja realizado o chamado desbaste das placas. Este é um processo no qual se consegue uma grande redução da espessura e onde o metal atinge uma temperatura mínima igual a temperatura de recristalização do alumínio que é de aproximadamente 350°C. Devido a este nível de temperatura, a ductilidade do material será máxima fazendo com que aconteça uma recristalização dinâmica na deformação plástica do material. A matéria-prima inicial para tal processo é uma placa, cujo peso varia de alguns quilos para até aproximadamente 15 toneladas, que são produzidos por fundição semicontínua, em molde com seção transversal retangular, que assegura a rápida solidificação do material e uma estrutura metalúrgica homogênea.

A laminação a quente se processa em laminadores reversíveis duos (dois cilindros) ou quádruplos (dois cilindros de trabalho e dois de apoio ou encosto), sendo que o material laminado será deslocado a cada passada entre os cilindros de laminação, sendo que a espessura de cada passe dependerá unicamente da abertura dos cilindros. A redução da espessura dependerá da dureza da liga que será laminada. Quando o material atingir no último passe uma espessura de 6 mm, será enrolado ou cortado em chapas planas, constituindo-se na matéria-prima para a laminação a frio. Podemos observar como funciona a laminação a quente na Figura 5:

Figura 5: Laminação a Quente



Fonte: ABAL ([s.d.])

2.5.3 Laminação Contínua

Segundo ABAL (2007), outro processo que é muito utilizado atualmente é o processo conhecido como fundição contínua, que elimina a etapa da 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 seção retangular e espessura aproximada de 6 mm. Esta mesma chapa será enrolada, obtendo-se assim um produto similar aquele obtido por laminação a quente, mas com estrutura bruta de fusão bastante refinada pela alta eficiência do refinador de grão utilizado no vazamento.

2.5.4 Laminação a Frio

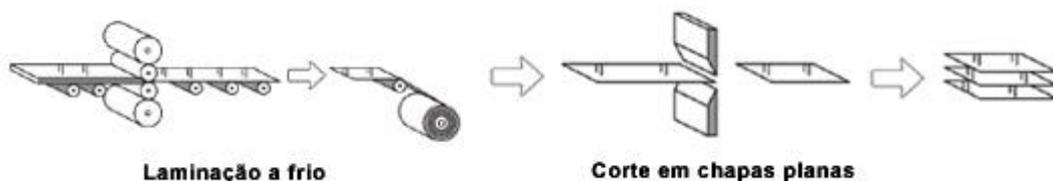
Segundo ABAL (2007), processo no qual o material é laminado a temperaturas bem inferiores em relação a temperatura de recristalização do alumínio, cuja matéria-prima vem da laminação a quente.

Segundo ABAL (2007), a laminação a frio faz com que o metal fique com um bom acabamento superficial, um preciso controle dimensional, além de permitir a redução da espessura das chapas, permitindo o aumento da resistência mecânica das chapas através do encruamento do material que será laminado de forma contínua, devido à ação dos cilindros de laminação reduzindo gradativamente a espessura da chapa.

Segundo ABAL (2007), a laminação a frio permite com que se possa produzir chapas com vários tipos de acabamento, desde um acabamento comum (sem brilho reflexivo) até um acabamento brilhante (espelhado ou polido).

Podemos observar como funciona a laminação a frio na Figura 6:

Figura 6: Laminação a Frio



Fonte: ABAL ([s.d.])

2.5.5 Laminação de Folhas

Segundo ABAL (2007), a matéria-prima das folhas é denominada de “foil stock”, cuja espessura é da ordem de 0,2 mm e sua classificação está contida classificação dos produtos laminados. Inicialmente, a folha é laminada em um laminador desbastador, que produz folhas grossas sendo em seguida laminada em um laminador intermediário, que produz folha média ou intermediária. As folhas finas, com espessura de até 0,005 mm, são produzidas em laminadores específicos, que concebem processo de laminação de folhas dupladas com lubrificantes entre elas, sendo posteriormente separadas numa máquina denominada de separadeira.

2.5.6 Reciclagem do Alumínio

A reciclagem é um dos atributos mais importantes do alumínio, pois qualquer produto fabricado com esse metal pode ser reciclado infinitas vezes. O exemplo mais comum que pode ser citado é a lata de alumínio para bebidas, cuja sucata transforma-se novamente em lata após a coleta e reciclagem, sem que haja qualquer limitação para seu retorno ao ciclo de produção. Esta característica ainda possibilita uma combinação única de vantagens para o alumínio, destacando-se, além da proteção ambiental e economia de energia, o papel multiplicador na cadeia econômica (ABAL, 2004).

A reciclagem de alumínio é feita tanto a partir de sobras do próprio processo de produção, como de sucata gerada por produtos com vida útil esgotada (ABAL, 2004).

Assim, a reciclagem se tornou uma característica intrínseca da produção de alumínio, pois as empresas sempre tiveram a preocupação de reaproveitar retalhos de chapas, perfis e laminados, entre outros materiais gerados durante o processo de fabricação (ABAL, 2004).

O reaproveitamento de sobras do processo pode ocorrer tanto interno como externamente, por meio de terceiros ou refusão própria. Em qualquer caso representa uma grande economia de energia e de matéria-prima, refletindo no aumento da produtividade e na redução da sucata industrial (ABAL, 2004).

Benefícios associados com a reciclagem:

- Assegura renda em áreas carentes, constituindo fonte permanente de ocupação e remuneração para mão-de-obra não qualificada.
- Injeta recursos nas economias locais, através da criação de empregos, recolhimento de impostos e desenvolvimento do mercado.

- Estimula outros negócios, por gerar novas atividades produtivas (máquinas e equipamentos especiais).
- Favorece o desenvolvimento da consciência ambiental, promovendo um comportamento responsável em relação ao meio ambiente, por parte das empresas e dos cidadãos.
- Incentiva a reciclagem de outros materiais, multiplicando ações em virtude do interesse que desperta por seu maior valor agregado.
- Reduz o volume de lixo gerado, contribuindo para a solução da questão do tratamento de resíduos resultantes do consumo.
- Economiza energia, otimizando o uso de recursos ambientais:
 - A reciclagem economiza até (95% da energia utilizada para produzir alumínio a partir da bauxita;
 - Cada tonelada reciclada poupa a extração de 4 toneladas desse minério que é a matéria-prima do alumínio.

Na Figura 7 pode-se observar um forno de reciclagem de alumínio:

Figura 7: Forno de Reciclagem Alumínio



Fonte: ABAL ([s.d.])

2.6 ALUMÍNIOS DA SÉRIE 5XXX

As ligas Al-Mg (série 5XXX) constituem um importante grupo de ligas de alumínio não tratáveis termicamente, ou sejam, não são endurecíveis por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, mas sim por solução sólida e encruamento (trabalho mecânico). Além desse ganho de resistência mecânica, o magnésio permite a essas ligas manterem um elevado nível de ductilidade, assim como excelente resistência à corrosão e soldabilidade (INFOMET, [s. d.]). As ligas Al-Mg são aquelas que possuem a melhor combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e ductilidade, possuindo propriedades mecânicas intermediárias entre as

das ligas da série 3XXX (Al-Mn) e as ligas endurecíveis por precipitação (Al-Cu, Al-Mg-Si e Al-Zn-Mg, séries 2XXX, 6XXX e 7XXX respectivamente). São utilizadas em aplicações nas quais se exige razoável resistência mecânica com excelente resistência à corrosão. Ligas Al-Mg com teores variando entre 3 e 5 % são muito utilizadas na indústria naval, na fabricação de diversos componentes de navios. As ligas AA5042, AA5352, AA5082 e AA5182 são usadas na fabricação de tampas para latas de bebidas, mais frequentemente as ligas AA5082 e AA5182. A liga AA5182, assim como a AA5052, também é usada na indústria automobilística. As ligas AA5356, AA5554 e AA5556 são usadas como metais de adição na soldagem (INFOMET, [s. d.]).

Embora as ligas Al-Mg estejam classificadas como ligas não endurecíveis por precipitação, por não apresentarem ganho de dureza devido à precipitação, em ligas como a AA5083, AA5086, AA5056 e AA5456 o teor de magnésio supera o limite de solubilidade, fazendo com que, em condições termodinamicamente favoráveis como temperaturas elevadas, ou mesmo longos tempos à temperatura ambiente, ocorrer precipitação das fases Al_3Mg_2 , Al_3Mg_5 ou Al_8Mg_5 nos contornos de grão, que, em vez de proporcionar algum ganho de dureza, causa problemas como aumento da susceptibilidade à corrosão nos contornos de grão e diminuição da resistência à corrosão sob tensão. Esse problema resultou no desenvolvimento da têmpera (grau de encruamento) H116, de modo a eliminar, ou minimizar essa instabilidade, permitindo um melhor aproveitamento das propriedades mecânicas e outras características favoráveis dessas ligas, que fazem com que elas sejam muito usadas para aplicações nas quais se deseja maior resistência mecânica do que a do alumínio comercialmente puro (série 1XXX). A elevada resistência mecânica e a boa soldabilidade dessas ligas fizeram com que elas estejam entre as ligas preferidas para algumas aplicações estruturais, para uso na fabricação de meios de transporte, nas indústrias de processamento e também para usos militares, nos quais se deseja boas propriedades balísticas e criogênicas (INFOMET, [s. d.]).

2.7 ALUMÍNIO AA5083

O alumínio AA5083 dispõe de uma excelente usinagem e estabilidade, com uma dureza entre 75 e 95 HB, variável conforme espessura, sendo muito utilizado em pequenas produções. O alumínio AA5083 contém de 4,0 a 4,9% de adição de magnésio, podendo se observar a composição química desta liga na Tabela 1, apresentando as melhores características das ligas de alumínio semi-acabados da série 5000. Garante uma boa soldabilidade, além disso, uma

interessante resistência, sobretudo na atmosfera marinha. São amplamente utilizados no segmento naval e na indústria em geral (CIMM, 2016).

“A liga AA5083 possui peso específico de $2,7\text{g/cm}^3$, sendo 1/3 menor que o aço, proporcionando um desgaste e esforço menor do equipamento, como também, facilitando a troca do molde” (CIMM, 2016).

A liga AA5083, quando submetida ao processo conhecido como sensitização, precipita a fase β conhecida como Mg_5Al_8 , em contorno de grão, fazendo com que o material possa vir a sofrer corrosão intergranular se o mesmo entrar em contato com determinados tipos de reagentes, como ácido sulfúrico, ácido nítrico ou mesmo ácido clorídrico. A sensitização é um dos fatores que deve ser evitado quando o alumínio estiver sendo produzido (SARTORI, 2016).

Para que nesta esta liga não ocorra a sensitização, deve-se resfriar rapidamente o material quando o mesmo estiver na seguinte faixa de temperatura: entre 60° e 200°C . (SARTORI, 2016).

2.8 CORROSÃO

Num aspecto muito difundido e aceito em todo o mundo, a corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente um material metálico, por uma ação química ou eletroquímica que acontece no meio ambiente e que pode estar ou não associada a esforços mecânicos ao qual os materiais podem ter sofrido. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e seu meio operacional pode representar alterações prejudiciais indesejáveis, ou seja, pode fazer com que um material perca muito de suas propriedades, como desgaste, variação química até mesmo uma mudança geral em sua microestrutura, fazendo com que o material não seja mais adequado para o uso (GENTIL, 2011).

Alguns materiais não metálicos como concreto, borracha, polímeros e madeiras, são exemplos de materiais que devido a ação química do meio ambiente sofrem deterioração que segundo alguns autores, também pode ser conhecida como corrosão. Assim por exemplo a deterioração do cimento Portland, empregado em concreto por ação de sulfato, é considerada um caso de corrosão do concreto, a perda de elasticidade de uma borracha devido à oxidação do ozônio, também pode ser considerada um exemplo de corrosão assim como a madeira exposta à solução de ácidos e sais ácidos perde sua resistência devido a um processo conhecido como hidrólise da celulose sendo este fato admitido como corrosão da madeira (GENTIL, 2011).

Outra forma de definir-se a corrosão é afirmando que a corrosão é um processo inverso da metalurgia, cujo principal objetivo é a extração de um determinado metal a partir de seus minérios ou outros compostos para que possa ser utilizado de uma maneira adequada, enquanto a corrosão tem por finalidade de oxidar o material, fazendo com que o mesmo perca muitas de suas propriedades e volte a seu estado original, ou seja o metal ou material que sofre a corrosão tende a voltar a ter as características originais de quando ainda não havia sido extraído. O óxido de ferro mais encontrado na natureza é a hematita, Fe_2O_3 , e a ferrugem é o Fe_2O_3 , hidratado, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{NH}_2\text{O}$, isto é, o metal tendendo a retornar a sua condição de estabilidade (GENTIL, 2011). Devido a corrosão, as mais variadas atividades sofrem problemas, como por exemplo, as indústrias químicas, petrolíferas, petroquímicas, naval, de construção civil, automobilísticas, nos meios de transportes aéreos, ferroviários, metroviários, marítimo, rodoviários e nos meios de comunicação, como sistemas de telecomunicações, na odontologia (em restaurações metálicas, aparelhos de prótese entre outros), na medicina na seção ortopédica e em obras de artes como monumentos antigos e esculturas (GENTIL, 2011).

2.9 CUSTOS

Graças ao avanço tecnológico mundialmente alcançado, os custos devido ao processo de corrosão aumentam de uma forma evidente, assim se tornando um fator que possui uma importância muito elevada que desse ser considerada antes mesmo de se construir uma estrutura, ou mesmo na fase de projeto de grandes instalações industriais, para evitar ou mesmo minimizar futuros processos corrosivos. Fontana já em 1986 afirmava que aproximadamente 30 bilhões de dólares poderiam ser economizados se todas as medidas economicamente viáveis fossem usadas para prevenção contra a corrosão (GENTIL, 2011).

2.10 CASOS BENÉFICOS DE CORROSÃO

- “A corrosão, além dos problemas associados com deterioração ou destruição de matérias, apresenta, sob determinado ponto de vista, não só esse lado negativo, mas também um lado positivo” (GENTIL, 2011).
- Assim podem-se citar como casos benéficos de corrosão de grande importância industrial:
- Alumínio anodizado, que consiste na oxidação de peças de alumínio, colocadas no anodo de cuba eletrolítica: ocorre o aumento de óxido de alumínio, Al_2O_3 , protetor, e confere bom aspecto decorativo à peça (GENTIL, 2011).

- Proteção catódica com anodos de sacrifício ou galvânicos para proteção de aço carbono usado em instalações submersas ou enterradas: formação de pilha galvânica na qual o catodo é o material a ser protegido, no caso o aço-carbono, e o anodo, material a ser corroído, pode ser zinco, alumínio ou magnésio (GENTIL, 2011).

2.11 FORMAS DE CORROSÃO

Segundo Callister (2008), a corrosão deve ser classificada de acordo com a maneira a qual a mesma irá se manifestar sobre o material. Portanto a corrosão metálica pode ser classificada em até oito formas diferentes: corrosão uniforme, corrosão por frestas, corrosão por pite, corrosão intergranular, corrosão por lixívia seletiva, corrosão por erosão e corrosão sobtensão.

- **Ataque Uniforme:** Segundo Callister (2008) é uma corrosão eletroquímica que ocorre com uma intensidade equivalente em toda a área da superfície exposta do material, que frequentemente deixa para trás uma incrustação ou depósito.
- Segundo Gentil (2011), a corrosão uniforme acontece por toda a superfície de um material, com isso o material tem uma perda uniforme de espessura, podendo ser também chamada como corrosão generalizada.
- **Corrosão Puntiforme ou por Pite:** Segundo Callister (2008), a corrosão por pites é outra forma muito localizada de ataque por corrosão, onde pequenos pites ou buracos se formam, penetrando a partir do topo da superfície horizontal de um determinado material, sendo também um dos mais traiçoeiros tipos de corrosão devido ao fato de ficar sem ser detectado com certa frequência por possuir uma pequena perda de material até que ocorra a falha do mesmo.
- **Corrosão Galvânica:** corrosão que ocorre devido à união elétrica de dois materiais (metais ou ligas) ao mesmo tempo em que são expostos a um eletrólito, o metal menos nobre ou mais reativo, de acordo com o ambiente em que estejam expostos irá sofrer o processo de corrosão enquanto o metal mais inerte, ou seja, que tem menos tendência de reagir, também conhecido como catodo, será protegido da corrosão (CALLISTER, 2008).
- **Corrosão por Frestas:** corrosão eletroquímica também pode ocorrer como uma consequência na diferença na concentração de íons ou gases que são dissolvidos em uma solução eletrolítica e conseqüentemente pode ocorrer entre duas regiões de uma mesma peça metálica. A corrosão por fresta ocorre no lugar que possui a menor concentração no caso de uma pilha de concentração desse tipo. Normalmente a fresta tem que ter uma largura suficiente para que a solução penetre sendo que ao mesmo tempo deve ser estreita o suficiente para que a solução ou

fluido fique estagnado, normalmente a largura de uma fresta é de vários milésimos de uma polegada (CALLISTER, 2008).

- **Corrosão Intergranular:** a corrosão intergranular é um ataque seletivo que acontece em torno do contorno de grão em ligas de Al – Cu, Al – Zn e Al – Mg com mais de 3% de magnésio (SARTORI, 2016).

É uma corrosão que como o próprio nome sugere, que ocorre preferencialmente ao longo dos contornos de grãos para algumas ligas em determinados ambientes. Como resultado final tem-se que uma amostra macroscópica que irá se desintegrar (desfazer) ao longo dos seus contornos de grãos, podendo até mesmo fazer com que o material se desintegre por completo (CALLISTER, 2008).

Segundo Sartori (2016), nas ligas de Al-Mg com mais de 3% de magnésio a corrosão intergranular irá ocorrer quando o material sofrer o processo de sensitização, que ocorre em temperaturas de 60° até 200°C aproximadamente. Quando o alumínio passa por essas temperaturas precipita-se a fase Mg_5Al_8 também chamada de fase β , e devido ao surgimento desta fase o material irá ficar com tendência a sofrer a corrosão intergranular.

2.12 SOLDAGEM

A soldagem é um processo que está intimamente ligado as mais importantes atividades industriais que existem no mundo moderno, como construção civil, construção naval, ferroviária, aeronáutica e automobilística, caldeiraria, construção civil metálica, indústria metalúrgica, mecânica e elétrica (SENAI, s. d).

A Associação Americana de soldagem define a soldagem como: “processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (SENAI, s. d).

A Associação Americana de Soldagem define que o primeiro processo de soldagem por fusão foi patenteado nos Estados Unidos em 1885, sendo um processo que utilizava o calor que era gerado através de um arco estabelecido entre o eletrodo de carvão e a peça onde o calor do arco fundia o metal no local da junta e quando o arco era retirado, o calor fluía para as zonas adjacentes e iria provocar a solidificação do banho de fusão (SENAI, s. d).

2.13 SOLDABILIDADE

Soldabilidade é a facilidade que os materiais possuem pelo fato de se unirem através do processo conhecido como soldagem, assim formando-se uma série contínua de soluções sólidas coesas, mantendo as propriedades mecânicas dos materiais originais (SENAI, s. d).

A composição química de um material é o principal fator que afeta a soldabilidade do material, além da capacidade de formar a série contínua de soluções sólidas entre um metal e outro, portanto um soldador qualificado deve saber atentamente como diferentes ligas metálicas se comportam diante os diversos processos de soldagem (SENAI, s. d).

2.14 METALURGIA DA SOLDAGEM

O fato simples de se usar calor em um processo de soldagem significa que alterações irão ocorrer na microestrutura de um determinado material metálico, na realidade isso ocorre na maioria dos casos, devido ao fato de que a soldagem reproduz no local da solda os mesmos fenômenos que ocorrem durante um processo de fundição, ou seja, do ponto de vista da estrutura metalográfica, o material irá apresentar características de metal fundido (SENAI, s. d).

Assim sendo, dependendo do processo de soldagem utilizado e da natureza dos metais que irão ser soldados, deve-se ter um maior ou menor tamanho da zona termicamente afetada, por exemplo na soldagem manual ao arco com eletrodos revestidos finos, a zona termicamente afetada é menor do que na soldagem a gás. É nessa zona que uma série de fenômenos metalúrgicos irão ocorrer (SENAI, s. d).

2.14.1 Zona Termicamente Afetada

A zona termicamente afetada (ZTA), é a zona na qual o metal é superaquecido de tal modo que o grão ira ter um aumento de tamanho e, portanto, irá resultar em uma alteração nas propriedades originais do material, sendo uma faixa normalmente mais frágil perto da junta soldada (SENAI, s. d).

“Ainda segundo SENAI ([s. d.]), zona termicamente afetada é a porção do metal de base que não foi fundido, mas cujas propriedades mecânicas ou microestrutura foi alterada pelo calor da soldagem, brasagem ou corte.”

2.15 SOLDAGEM EM MATERIAIS NÃO FERROSOS

Os principais elementos empregados para fabricar arames de alumínio para soldagem são o magnésio, manganês, zinco, silício e cobre. A principal razão para adicionar esses elementos é aumentar a resistência mecânica do alumínio puro. Entretanto, a resistência à corrosão e a soldabilidade também merecem atenção. Cada arame contém adições de diversos elementos de liga para melhorar as propriedades da solda, e é desenvolvido para soldar um dado tipo de alumínio (SENAI, 2008).

“Os arames mais populares são as ligas AWS ER5356 – com adição de magnésio – e a liga AWS ER4043 – com adição de silício (SENAI, [s. d.]).”

2.16 SOLDAGEM DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

A soldagem em ligas de alumínio apresenta algumas peculiaridades em relação a soldagem dos aços, porém, já é uma prática consideravelmente dominada pelos profissionais hoje em dia, sendo a principal dificuldade encontrada que está associada a soldagem do alumínio e de suas ligas está relacionada a presença de uma fina camada de óxido refratário que se forma na superfície do metal quando o mesmo entra em contato com a atmosfera e que confere ao alumínio uma grande resistência a corrosão. A alta condutibilidade térmica e elétrica do alumínio bem como seu alto coeficiente de expansão linear também influencia significativamente nos requisitos finais para a soldagem ser executada (WHITE MARTINS, [s. d.]).

2.17 SOLDAGEM GMAW E GTAW DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

A maioria das ligas de alumínio existentes é compatível com os processos tradicionais de união (soldagem a arco com proteção gasosa, soldagem por resistência elétrica e brasagem). A soldagem com eletrodos revestidos (processo SMAW), largamente empregada em aços, não é muito comum na união do alumínio e suas ligas devido à dificuldade do processo (WHITE MARTINS, [s. d.]).

Processos MIG e TIG (GMAW e GTAW) respectivamente são empregados com sucesso na maior parte das ligas de alumínio fundidas ou trabalhadas com exceção apenas de algumas ligas de alumínio-cobre, por estas apresentarem melhores características de união quando são soldadas através do processo de resistência elétrica (WHITE MARTINS, [s. d.]).

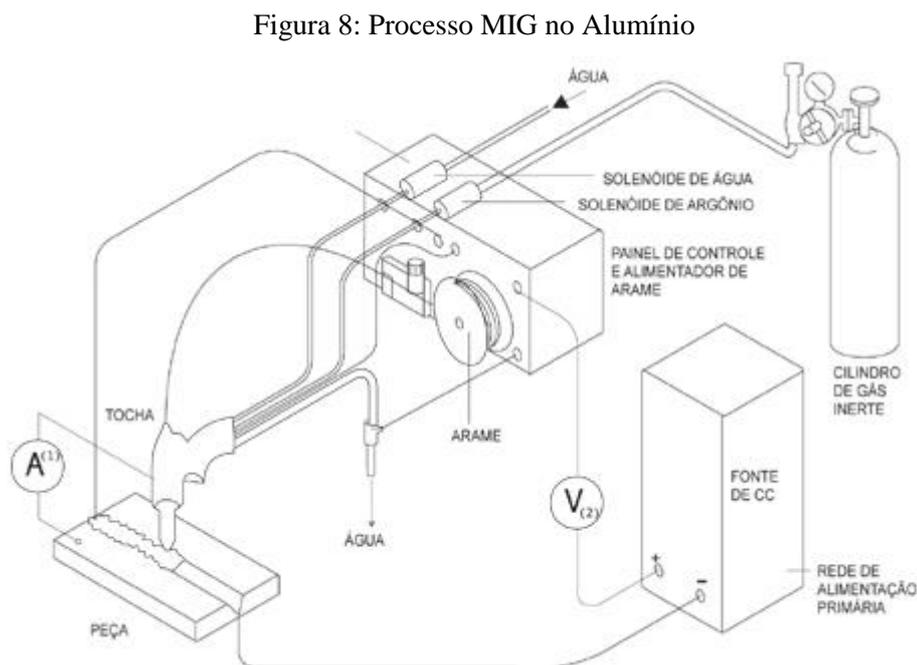
Porem convém destacar que a soldagem das ligas de alumínio requer uma observação de procedimentos específicos, que envolvem desde o armazenamento adequado do material antes da solda ser realizada até mesmo a limpeza das juntas antes da operação de soldagem para assim a solda ter uma excelente qualidade quando as juntas forem unidas (WHITE MARTINS, [s. d.]).

2.18 PROCESSO DE SOLDA MIG NO ALUMÍNIO (METAL INERT GAS)

Segundo ABAL ([s.d.]), a soldagem MIG é um processo em que o arco elétrico, obtido por meio de uma corrente contínua, é estabelecido entre a peça e um arame de alumínio ou liga de alumínio, que combina as funções de eletrodo e metal de adição, numa atmosfera de gás inerte. No processo MIG o eletrodo é sempre o pólo positivo do arco elétrico. Utilizando-se as versões automática e semi-automática é possível soldar o alumínio desde espessuras finas, cerca de 1,0 mm, até espessuras sem limite.

Segundo ABAL ([s.d.]), assim como no processo TIG, o gás inerte protege a região do arco contra a contaminação atmosférica durante a soldagem. Na soldagem MIG do alumínio, normalmente são utilizados os gases argônio, hélio ou uma mistura de argônio/hélio.

A Figura 8, exemplifica a soldagem MIG:



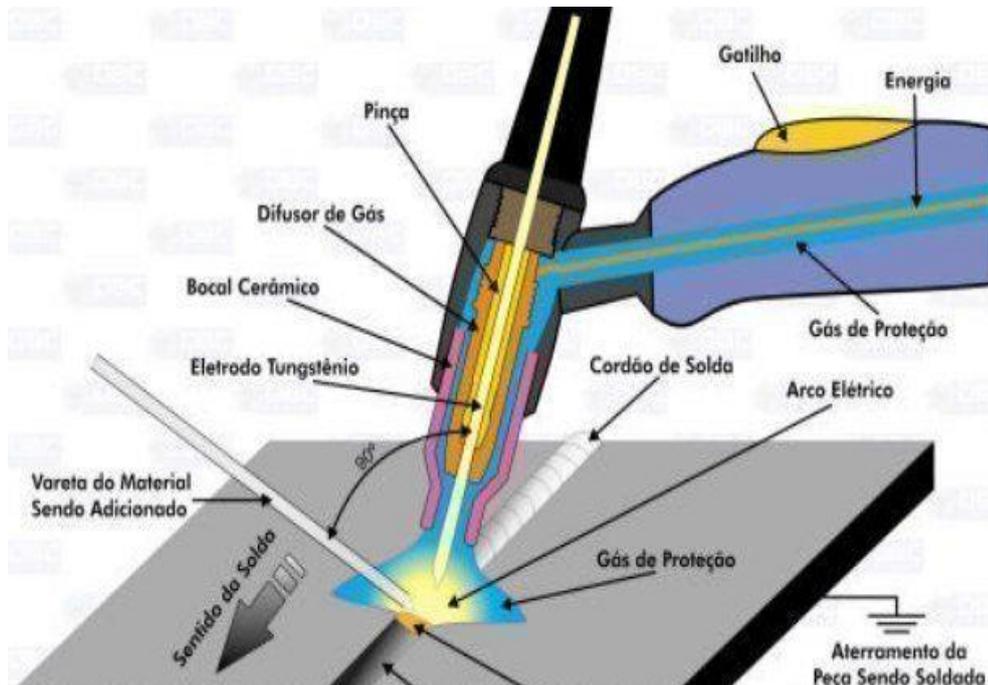
Fonte: ABAL ([s.d.])

2.19 PROCESSO DE SOLDA TIG NO ALUMÍNIO (TUNGSTEN INERT GAS)

Segundo ABAL ([s.d.]), o processo TIG é o mais aplicado na soldagem das ligas de alumínio e foi o primeiro a ser desenvolvido com proteção de gás inerte adequado para soldar o alumínio. Na soldagem TIG, o arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça, numa atmosfera de gás inerte. Neste processo, o arco elétrico pode ser obtido por meio de corrente alternada (CA), corrente contínua (CC) e eletrodo positivo ou corrente contínua e eletrodo negativo.

A Figura 9, exemplifica o processo TIG no alumínio:

Figura 9: Soldagem TIG no Alumínio



Fonte: DBC Guias e Tutoriais ([s.d.])

2.20 CORDÃO DE SOLDA

Propriedades de solidificação do cordão de solda são influenciadas de acordo com a composição química da taxa de solidificação. Um aumento na taxa de solidificação irá contribuir para obtenção de melhores propriedades mecânicas, devido à formação de uma microestrutura mais fina. Ainda assim, a taxa de solidificação será tanto maior, quanto menor for o aporte térmico sendo este último influenciado pela velocidade da soldagem de tal modo que velocidades

maiores diminuem o aporte térmico cedido à solda e o tamanho dos cordões de solda são muito pequenos podendo trincar durante a soldagem devido as tensões geradas em virtude da restrição imposta pelo metal de base (SENAI, [s. d.]).

2.21 ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)

De acordo com SENAI (2008), o efeito do calor da soldagem sobre as ligas de base em alumínio varia de acordo com a distância a contar da solda podendo ser dividido aproximadamente em áreas que exprimem as diferentes temperaturas atingidas pelo metal. O período de tempo em cada temperatura também é um fator significativo para as ligas de alumínio tratáveis termicamente.

As larguras das áreas e o grau de transformações metalúrgicas nas ligas de alumínio tratáveis termicamente irão depender da espessura e geometria que a junta irá possuir, do procedimento de soldagem, temperatura de pré-aquecimento e interpasses e dos efeitos térmicos do backing (junta de cobre) e dos dispositivos de fixação do material. A ZTA nas juntas feitas com os processos com proteção de gás inerte raramente estende-se além de meia polegada (12,7 mm) da linha do centro da solda, contudo para a finalidade de um projeto deve-se assumir o valor de uma polegada (25,4 mm) de largura para cada lado da junta (SENAI, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Foi utilizada uma chapa de alumínio da liga AA5083, que possui como composição química Si 0,40 Fe 0,40 Cu 0,10 Mn 0,40 – 1,0 Mg 4,0 – 4,9 Cr 0,05 – 0,25 Zn 0,25 Ti 0,15 outros 0,05 - 0,15.

Todos os procedimentos para esse estudo foram realizados nas dependências da Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, bem como os equipamentos e laboratórios.

3.2 MÉTODOS

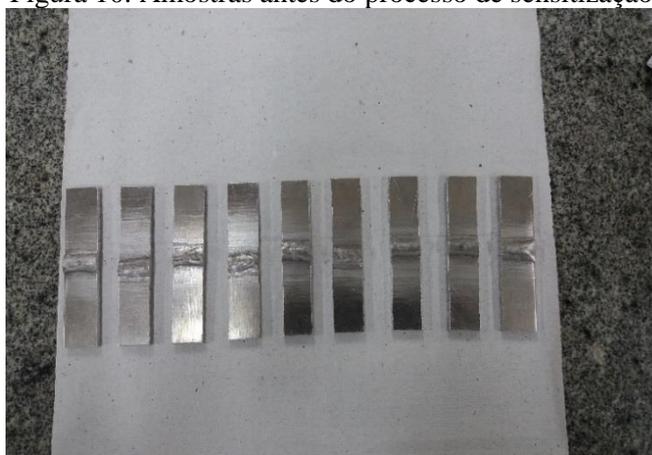
Para dar-se início ao trabalho onde iremos analisar comparativamente o comportamento da liga sensitizada e não sensitizada mergulhada dentro de uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4), foram necessárias algumas preparações:

3.2.1 Preparação das amostras

O material a ser estudado neste projeto é a liga AA5083, que tem como principal elemento de liga o magnésio.

Na Figura 10 podemos observar as amostras antes de passarem pelo processo de sensitização:

Figura 10: Amostras antes do processo de sensitização.



FONTE: Os autores

3.2.2 Sensitização

Após conseguir as amostras, foram colocadas dentro de um forno 4 amostras, que pode ser observado na Figura 11, por um tempo de 72 horas à uma temperatura de 180°C, para que as mesmas sofram o processo de sensitização, que é o foco para o estudo deste trabalho.

Figura 11: Forno para a Sensitização



FONTE: Os autores

3.2.3 Corte das amostras após sensitização

Após a sensitização das amostras, cortamos algumas ainda em seu estado inicial, para que pudéssemos observar como iria ocorrer a corrosão em ambos os processos para poder obter um resultado detalhado de como a sensitização afeta a qualidade do metal. Após estas preparações iniciais serem feitas, partimos para a segunda etapa que foi realizar a metalografia da amostra na condição inicial antes delas passarem pelo processo de corrosão que seriam submetidas após a realização do ensaio metalográfico. Após, realizou-se o ataque da amostra com uma solução de 40% de H_3PO_4 (ácido fosfórico) para revelar a fase β na microestrutura do material.

Para a realização do ensaio metalográfico, foram seguidos os seguintes passos à seguir:

1. Corte das amostras na cut-off;
2. Pré-lixamento e embutimento das amostras;
3. Lixamento da amostra a partir de 180 micras até 2000 micras respectivamente;
4. Polimento inicial das amostras em pasta de diamante de 3 micras;
5. Polimento final das amostras em sílica coloidal concentrada;
6. Ataque metalográfico com uma solução de H_2PO_4 com uma concentração de 40%;

3.2.4 Limpeza inicial das amostras

Para efetuarmos a limpeza inicial da peça, seguimos os seguintes passos:

1. Solução de NaOH (soda cáustica) 97% pura – concentração de 0,5%;
2. Lavar as amostras em água;
3. Mergulhar as amostras em solução de ácido nítrico (HNO_3) com uma concentração de 65%;
4. Lavar com água para cortar a reação do ácido nítrico e em seguida lavar com álcool etílico;
5. Secagem e pesagem das amostras;

3.2.5 Ensaio de corrosão

Para efetuarmos o ensaio de corrosão seguimos os seguintes passos:

1. Separamos as amostras sensibilizadas e as não sensibilizadas em beckers.
2. Mergulhou-se as amostras em ácido sulfúrico por 24 horas, para que ocorresse a corrosão das amostras, como pode ser observado na Figura 12:

Figura 12: Banho em ácido sulfúrico por 24 horas



Fonte: Os autores

3. Após o banho em ácido sulfúrico, preparou-se as amostras para a limpeza final e a metalografia final.

3.2.6 Limpeza e metalografia após teste de corrosão

Para efetuar as limpezas das amostras foram necessárias duas soluções: uma de 0,5% de soda caustica e uma de ácido nítrico concentrado, cada uma com seu uso determinado de acordo com o que o professor orientador passou durante a elaboração do trabalho.

Para a limpeza foram seguidos os seguintes passos:

1. Mergulhar as amostras em soda caustica numa temperatura de 80°C por 60seg;
2. Lavar as amostras em água corrente para cortar a reação do ácido;
3. Mergulhar as amostras em ácido nítrico concentrado por um tempo de 30seg;
4. Lavar novamente em água corrente para cortar a reação do ácido;
5. Secar as amostras e
6. Pesar todas as amostras.
7. Após a limpeza das amostras, efetuamos a última metalografia do material, para observar como a microestrutura seria afetada após o ensaio de corrosão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a limpeza e metalografia final das amostras os resultados obtidos foram analisados como a seguir:

1. Após a pesagem foi-se obtido o seguinte resultado de perda de massa que pode ser analisado na Tabela 2 com os pesos iniciais, após a corrosão e a perda de massa das amostras.

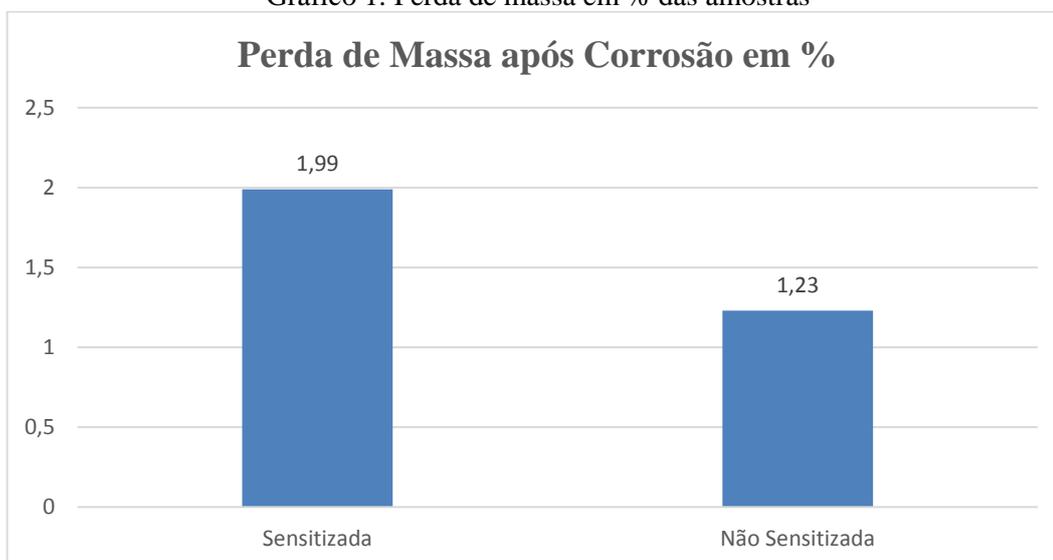
Tabela 2: Pesagem Inicial e Final das Amostras

Amostras para Ensaio de Corrosão com solução de H₂SO₄ 80%				
Amostras		Peso Inicial	Peso após corrosão	% de perda
Amostra Não Sensitivada		8,5485g	8,4432g	1,23
Amostra Sensitivada		7,9935g	7,8337g	1,99

Fonte: Autores

Pode-se observar que apesar de ter sido uma perda pequena de massa, a amostra sensitivada teve uma perda de massa muito maior como pode ser observado nos gráficos 1:

Gráfico 1: Perda de massa em % das amostras



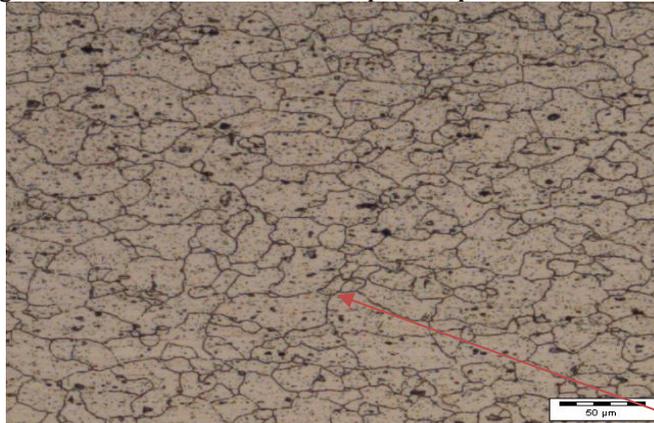
Fonte: Os autores

Após ser feita a tabela e os gráficos da perda de massa, o próximo passo a ser feito foi a metalografia do material, no qual obtivemos os seguintes resultados:

➤ Amostras Iniciais

Em um microscópio óptico as amostras foram analisadas onde ficou bastante evidente a precipitação em rede contínua em contorno de grão da fase Mg_5Al_8 na amostra sensibilizada. As Figuras 13 e 14 ilustram as respectivas microestruturas:

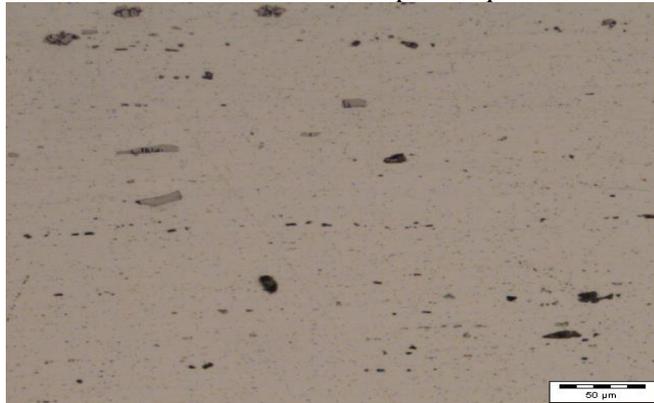
Figura 13: Amostra Sensibilizada após ataque com H_3PO_4 40%



FONTE: Os autores

Fase β Mg_5Al_8

Figura 14: Amostra Não Sensibilizada após ataque com H_3PO_4 40%



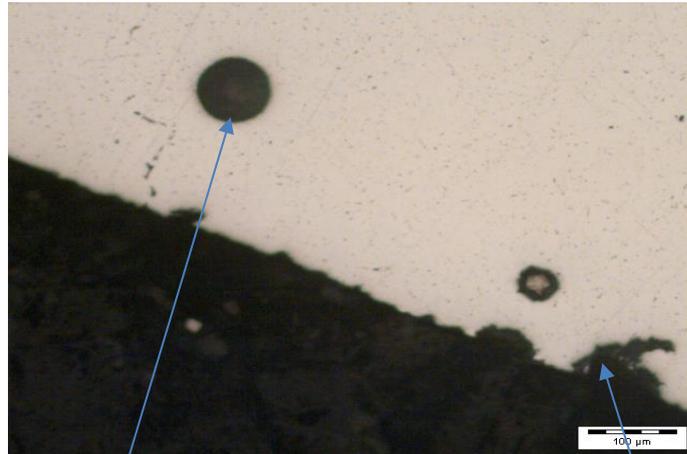
FONTE: Os autores

➤ Amostra não Sensibilizada

A seguir nas Figuras 15 e 16, o resultado da avaliação final da amostra não sensibilizada após a corrosão.

Na Figura 15, pode-se observar que não ocorreu o mecanismo de corrosão intergranular, porém, pode-se observar a formação de um pite:

Figura 15: Mostra o cordão de solda da amostra não sensibilizada após teste de corrosão em ácido sulfúrico com aumento de 100x



Fonte: Os autores

Inclusão

Corrosão por pite

Na Figura 16 podemos ver um leve ataque superficial:

Figura 16: Mostra o metal de base da amostra não sensibilizada após teste de corrosão em ácido sulfúrico com aumento de 100x

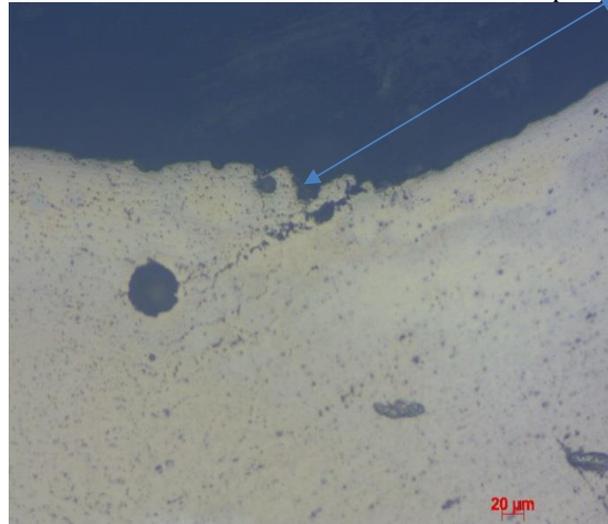


Fonte: Os autores

área corroída

Na Figura 17 podemos observar um leve ataque superficial na amostra não sensibilizada:

Figura 17: Amostra não sensibilizada após ataque com ácido fosfórico. Zona entre metal de base e ZTA.
200x de aumento. Corrosão por pite.



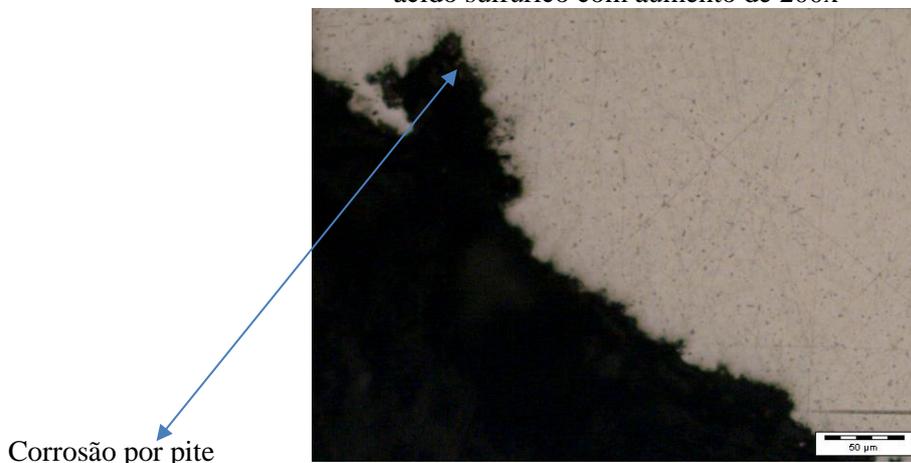
Fonte: Os autores

➤ Amostra Sensibilizada:

A seguir nas Figuras 18 e 19, o resultado da avaliação final da amostra sensibilizada após banho de ácido sulfúrico.

Na Figura 18, pode-se observar que o mecanismo de corrosão foi um pouco mais severa na região da solda do que mostrado na amostra que não sofreu a sensibilização, e como esta amostra teve o mecanismo de sensibilização a corrosão nela foi pior, porém não ocorreu o mecanismo de corrosão intergranular e sim os mecanismos de corrosão por pite na solda.

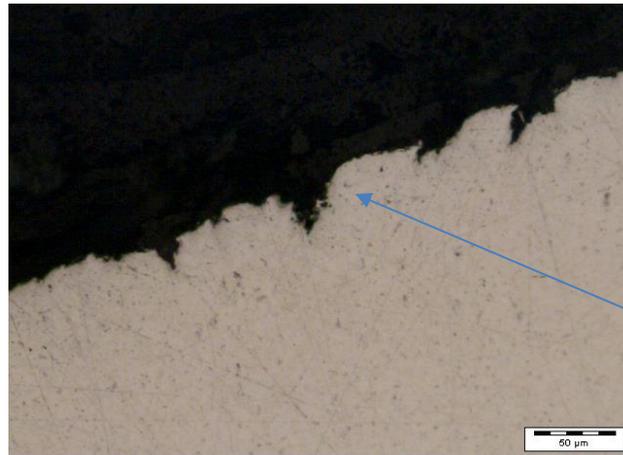
Figura 18: Mostra pite formado na região da solda da amostra sensibilizada após teste de corrosão com ácido sulfúrico com aumento de 200x



Fonte: Os autores

Na Figura 19 podemos observar o mecanismo de corrosão por pite na região do metal de base da amostra que foi sensibilizada, a corrosão foi mais severa devido ao fato da sensibilização, porém não demonstrou sinais de que ocorreria a corrosão intergranular em contato com ácido sulfúrico.

Figura 19: Leve ataque superficial no metal base após teste de corrosão em ácido sulfúrico com aumento de 200x

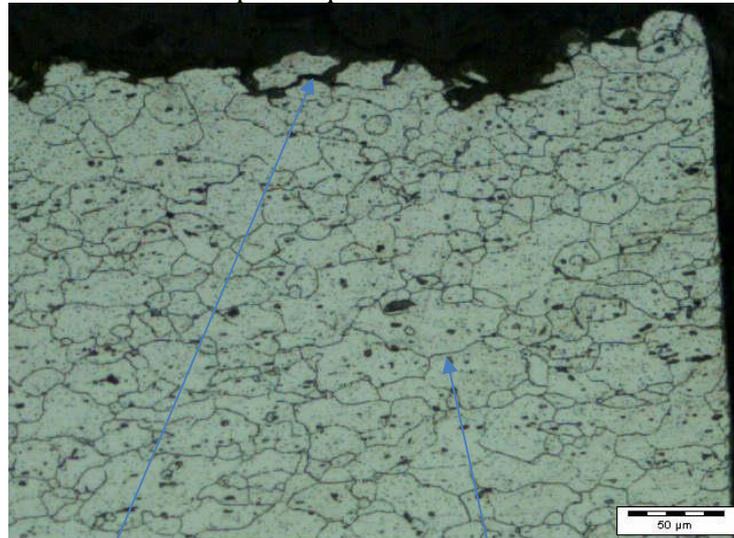


Área corroída

Fonte: Os autores

Nas Figuras 20 e 21 podemos observar que os contornos de grão não foram prejudicados durante o teste de corrosão, comprovando que ocorreu apenas o início do mecanismo de corrosão intergranular na amostra sensibilizada.

Figura 20: Amostra sensibilizada após ataque ácido fosfórico metal de base. Aumento 200x

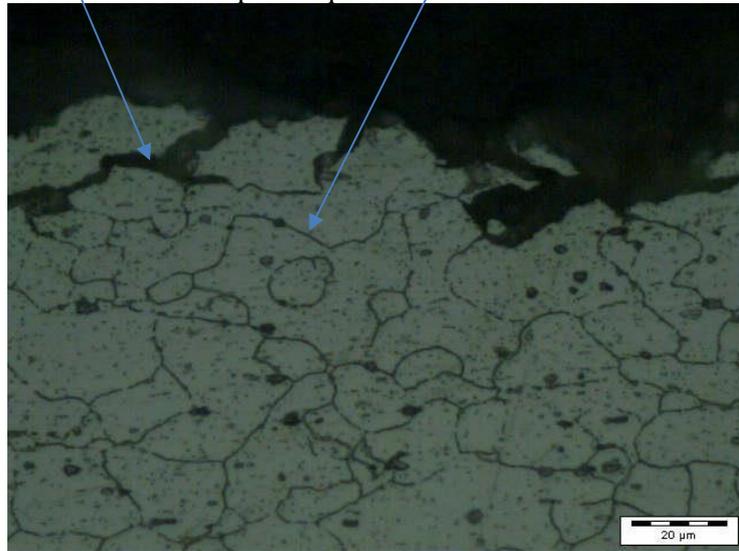


Corrosão Intergranular

Fase β Mg_5Al_8

Fonte: Os autores

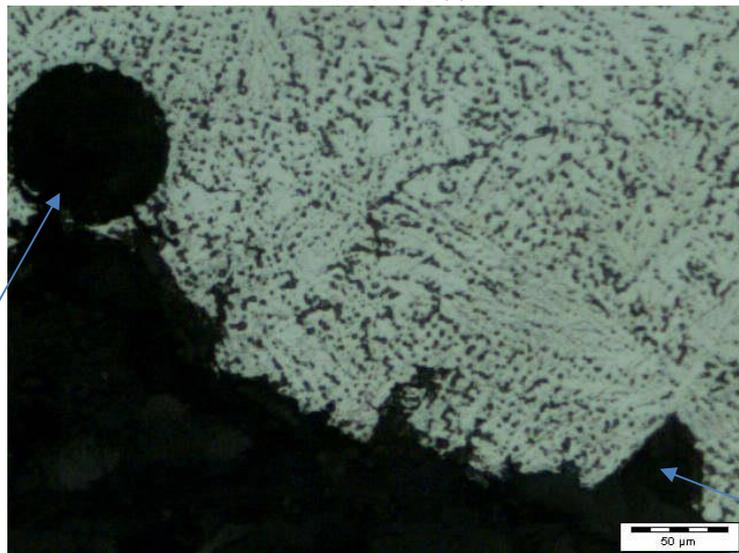
Corrosão Intergranular Fase β Mg_5Al_8
 Figura 21: Amostra sensibilizada após ataque ácido fosfórico metal de base. Aumento 500x



Fonte: Os autores

Nas Figuras 22 e 23 podemos observar a ZTA da amostra sensibilizada após ao ataque com ácido fosfórico. Nesta imagem podemos concluir que na ZTA não houve uma corrosão intergranular e sim apenas alguns pites e um ataque severo nas bordas da amostra.

Figura 22: Região da solda após teste de corrosão em ácido sulfúrico e ataque com H_3PO_4 40%.
 Aumento de 200x

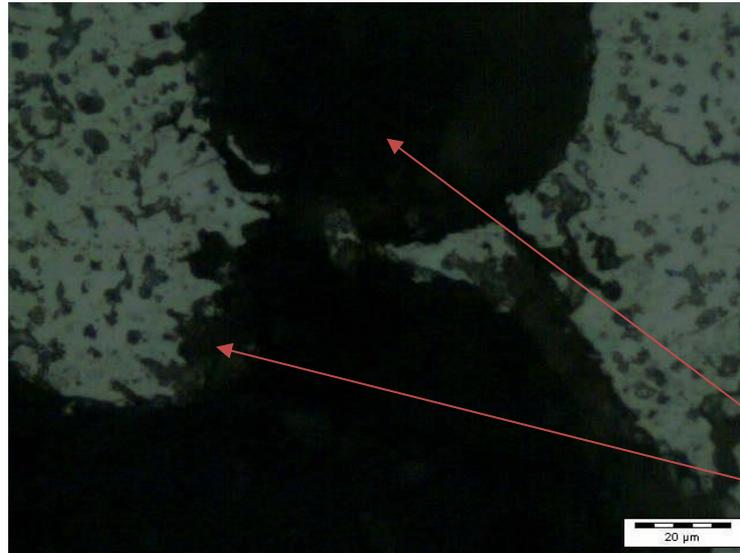


Inclusão

Fonte: Os autores

Pite

Figura 23: Região da solda após teste de corrosão em ácido sulfúrico e ataque com H_3PO_4 40%. Aumento de 500x

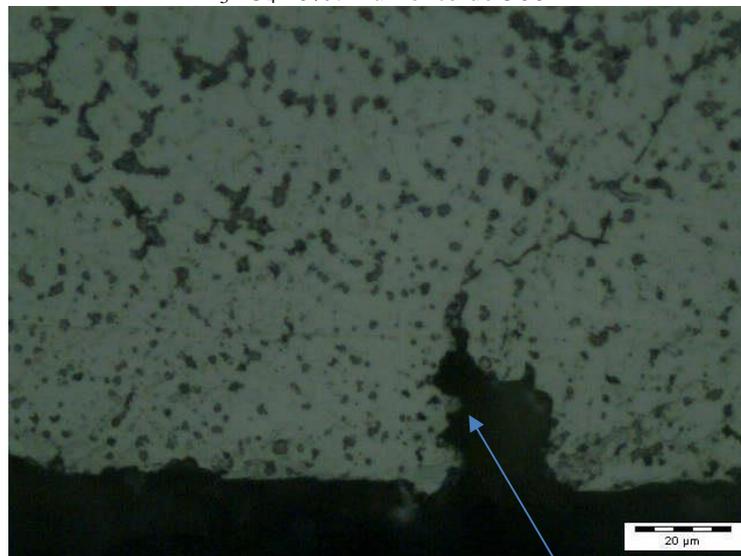


Pite e inclusão

Fonte: Os autores

Na Figura 24 podemos analisar que na região da solda formou-se um pite:

Figura 24: Formação de pite na região da solda após teste de corrosão em ácido sulfúrico e ataque com H_3PO_4 40%. Aumento de 500x



Fonte: Os autores

Corrosão por pite

5 CONCLUSÃO

A liga AA5083 quando submetida a temperatura elevada em torno de 60° a 200°C por tempo prolongado, no caso deste trabalho por 72 horas, causa a precipitação da fase β em contorno de grão.

No metal de base foi possível avaliar um começo de corrosão intergranular. Com isto foi possível concluir que quanto mais tempo a liga AA5083 ficar em contato com o ácido sulfúrico, menor será a sua resistência a corrosão intergranular.

O processo de soldagem não potencializou a formação da fase β em rede continua em contorno de grão.

O ácido sulfúrico causou uma leve corrosão intergranular na liga AA5083 na condição sensibilizada.

O ácido sulfúrico quando em contato com a liga AA5083 provocou corrosão por pite.

A liga AA5083 na condição sensibilizada apresentou uma pequena perda na resistência a corrosão por pite.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar o mesmo trabalho, porém utilizar concentrações e tempos diferentes por exemplo: 50% de concentração de H_2SO_4 por um tempo de 72 horas imersas na solução; 20% de concentração de H_2SO_4 por um tempo de 48 horas.

Pode-se mudar também o padrão da temperatura e fazer o mesmo teste utilizando temperaturas acima da temperatura ambiente.

REFERÊNCIAS

ABAL, **Automotivo e Transportes**, Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. ([s.d.]). Disponível em <<http://abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/>>. Acesso em 04/07/2017.

ABAL, **Bens de Consumo**, Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. ([s.d.]). Disponível em <<http://abal.org.br/aplicacoes/bens-de-consumo/>>. Acesso em 04/07/2017.

ABAL, **Cadeia Primária**, Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. ([s.d.]). Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>>. Acesso em 02/06/2017.

ABAL, **Características Físicas e Químicas**, Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. ([s.d.]). Disponível em <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em 04/07/2017.

ABAL. **Guia Técnico do Alumínio: Estruturas**. 1ª ed. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2001.

ABAL. **Guia Técnico do Alumínio: Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. 1ª ed. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2007.

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

ABAL, **Reciclagem**, Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. ([s.d.]). Disponível em <<http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/reciclagem/>>. Acesso em 02/06/2017.

ABAL, **Soldagem**, Artigo. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. ([s.d.]). Disponível em <<http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/soldagem/>>. Acesso em 02/06/2017.

ABAL. **Guia Técnico do Alumínio: Tratamento Térmico**. 1ª ed. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2003.

BIANCHI, José Carlos de Azambuja; ALBRECHT, Carlos Henrique; MAIA, Daltamir Justino. **Universo da Química: Corrosão**. 1ª ed. São Paulo: FTD, 2005.

COOPERMETAL. **Informações Técnicas Alumínio 5083**. Catálogo Informativo. São Paulo. [s.d.]. Disponível em: <http://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-copp_alumi5083.pdf>. Acesso em 17/11/2016.

DBC, **Guias e tutoriais**, Artigo. DBC. São Paulo. ([s.d.]). Disponível em <<http://guias.oxigenio.com/processo-de-soldagem-tig>>. Acesso em 04/08/2017.

ECYCLE. **Alumínio: o que é? Quais suas propriedades? Quais os impactos que ele pode trazer ao homem e ao planeta?**. Artigo. ECYCLE. São Paulo. [s. d]. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/63-meio-ambiente/3743-o-aluminio-elemento-no-mundo-producao-caracteristicas-propriedades-reciclagem-problemas-toxicacao-toxico-alzheimer-lama-vermelha.html>>. Acesso em 17/11/2016.

GENTIL, Vicente. **CORROSÃO**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INFOMET, **Ligas Al-Mg**. Artigo. INFOMET. [s.l.]. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=53>>. Acesso em: 17/11/2016.

SARTORI, Alexandre. **Aula de Corrosão**. Aula. FATEC. 2016.

SARTORI, Alexandre. **Aula de Materiais Não Ferrosos**. Aula. FATEC. 2016.

SENAI, **Soldagem: Processos de Soldagem**. 1ª ed. São Paulo: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, 2008.

SENAI, **Soldagem: Soldagem do Alumínio e suas Ligas**. 1ª ed. São Paulo: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, [s. d.].

SENAI, **Soldagem: Tecnologia da Soldagem**. 1ª ed. São Paulo: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, [s. d.].

SOUZA, Líria Alves de. **Obtenção do Alumínio**, Artigo. Mundo da Educação. ([s.l.]). ([s.d.]). Disponível em <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/obtencao-aluminio.htm>>. Acesso em 01/12/2016.

WHITE MARTINS, **Soldagem do Alumínio e suas Ligas**. Informe Técnico. White Martins. São Paulo. ([s.d.]). Disponível em <<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metal/soldagem-do-aluminio-e-suas-ligas.pdf>>. Acessado em 04/12/2016.

WILLIAM D. CALLISTER, Jr. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução**. 7^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.