Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

ESTUDO DO EFEITO DA SENSITIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DA LIGA AA5083 EM CONTATO COM SOLUÇÃO DE ÁCIDO NÍTRICO COM CONCENTRAÇÃO DE 65%

Emily Mariane Roque da Silva
Gabriel Caique de Jesus Oliveira

Pindamonhangaba - SP
2024

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

ESTUDO DO EFEITO DA SENSITIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DA LIGA AA5083 EM CONTATO COM SOLUÇÃO DE ÁCIDO NÍTRICO COM CONCENTRAÇÃO DE 65%

Emily Mariane Roque da Silva
Gabriel Caique de Jesus Oliveira

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

Orientador(a): Prof. Me. Alexandre Sartori

Pindamonhangaba - SP
2024

S586e Silva, Emily Mariane Roque da.
Estudo do efeito da sensitização na resistência à corrosão da Liga AA5083 em contato com solução de ácido nítrico com concentração de 65% / Emily Mariane Roque da Silva; Gabriel Caique de Jesus Oliveira / FATEC Pindamonhangaba, 2024.
51f.; il.

Orientador: Professor Me. Alexandre Sartori
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2024

1. Sensitização. 2. Corrosão. 3. Alumínio magnésio. 4. Liga AA5083. I. Silva, Emily Mariane Roque da. II. Oliveira, Gabriel Caique de Jesus. III. Sartori, Alexandre. IV. Título.

CDD 669

Sueli Camargo de Souza – Bibliotecária FATEC Pindamonhangaba – CRB/8 7788

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

"ESTUDO DO EFEITO DA SENSITIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DA LIGA AA5083 EM CONTATO COM SOLUÇÃO DE ÁCIDO NÍTRICO COM CONCENTRAÇÃO DE 65%".

Emily Mariane Roque da Silva
Gabriel Caique de Jesus Oliveira

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

Comissão Examinadora

Orientador – Prof. Me. Alexandre Sartori

Membro – Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho

Membro – Prof. Me. Amir Rivaroli Junior

Pindamonhangaba, 28 de junho de 2024.

DEDICATÓRIA

Emily Mariane Roque da Silva

Dedico esse trabalho aos meus pais que sempre foram a minha base me dando apoio e todo o incentivo necessário, aos meus amigos que me acompanharam em cada etapa e ao professor e orientador Alexandre Sartori que proporcionou toda orientação e auxílio para que fosse possível o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Gabriel Caique de Jesus Oliveira

A minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e dando forças para continuar. Aos auxiliares docentes, em especial ao senhor Luiz, que sempre nos ajudou com a maior dedicação. Por fim aos professores em específico ao Professor e orientador Alexandre Sartori, com sua ajuda imprescindível para a finalização desse trabalho.

AGRADECIMENTO

Emily Mariane Roque da Silva

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me guiado e proporcionado cada conquista ao longo desse percurso. Dedico um agradecimento especial à minha família, pelo amor e apoio que tornaram possível a conclusão dessa etapa em minha vida. Por fim, não posso deixar de mencionar meus colegas de curso, que sempre estiveram ao meu lado, principalmente ao Gabriel Caique de Jesus Oliveira, que durante esse período me proporcionou compartilhamento de muitas ideias fundamentais para a conclusão desse trabalho.

Gabriel Caique de Jesus Oliveira

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado inspiração e benção para finalizar o curso. Agradeço minha família pelo apoio e total compreensão, colaboração e incentivo durante o curso. Meus amigos de classe que fizeram esse percurso ser ainda mais especial e divertido. Agradeço também a Emily Mariane Roque da Silva que me incentivou, me inspirou durante esse período e me ajudou firmemente com ideia e propostas para realização desse trabalho.

Em conjunto, gostaríamos de agradecer ao nosso orientador/professor Alexandre Sartori, pela orientação paciente e valiosos insights ao longo deste processo. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Também aos auxiliares docentes, que nos ajudaram com tudo o que precisávamos durante o curso.

Nem você, eu ou ninguém vai bater tão forte quanto a vida. Mas a questão não é o quão forte você bate, mas sim o quanto você aguenta apanhar e continuar seguindo em frente. O quanto você resiste e continua seguindo adiante. É assim que se vence uma luta!

Rocky Balboa

SILVA, E.M.R.; OLIVEIRA, G.C.J. **Estudo do efeito da sensitização na resistência à corrosão da liga AA5083 em contato com solução de ácido nítrico com concentração de 65%**. 2024. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2024.

RESUMO

A liga de alumínio AA5083, é uma escolha em muitas indústrias devido às suas propriedades excepcionais. Com uma notável resistência à corrosão e alta resistência mecânica, ela desfruta de uma posição de destaque em várias aplicações industriais. Desde a construção naval até a fabricação de equipamentos de transporte e estruturas arquitetônicas, essa liga desempenha um papel crucial devido à sua capacidade de resistir à corrosão em ambientes desafiadores, como os marinhos. Foi considerado como problema de pesquisa desse trabalho acadêmico, identificar se a sensitização na microestrutura da liga AA5083, favorecerá a formação de corrosão. O objetivo principal que irá compor o desenvolvimento desse estudo será comprovar o efeito da sensitização da liga AA5083 na resistência a corrosão. Os materiais metálicos sofrem oxidação quando expostos a agentes oxidantes, levando à formação de óxidos que comprometem a integridade e durabilidade do substrato metálico. Após 24 horas os corpos-de-prova imersos em ácido nítrico 65%, mostraram que na condição inicial e à 80°C apresentaram alguns pites de corrosão, já a tratada a 250°C teve leve corrosão uniforme. A amostra que foi ao forno à 80°C por 72 horas não houve precipitação da fase beta em rede contínua em contorno de grão, ao contrário da amostra que foi ao forno à 160°C por 72 horas apresentou a precipitação da fase beta em rede continua em contorno de grão e por consequência corrosão intergranular. Já a amostra que foi ao forno à 250°C por 72 horas ocorreu a precipitação da fase beta no interior do grão.

Palavras-chave: Sensitização. Corrosão. Liga AA5083. Alumínio magnésio.

SILVA, E.M.R.; OLIVEIRA, G.C.J. **Study of the effect of sensitization on the corrosion resistance of the AA5083 alloy in contact with a nitric acid solution with a concentration of 65%.** 2024. Undergraduate Work (Metallurgical Process Technology Course). Pindamonhangaba Faculty of Technology. Pindamonhangaba. 2024.

ABSTRACT

AA5083 aluminum alloy is a choice in many industries due to its exceptional properties. With remarkable corrosion resistance and high mechanical strength, it enjoys a prominent position in various industrial applications. From shipbuilding to the manufacture of transportation equipment and architectural structures, this alloy plays a crucial role due to its ability to resist corrosion in challenging environments such as marine environments. The research problem of this academic work was considered to be identifying whether sensitization in the microstructure of the AA5083 alloy will favor the formation of corrosion. The main objective that will comprise the development of this study will be to prove the effect of sensitization of the AA5083 alloy on corrosion resistance. Metallic materials undergo oxidation when exposed to oxidizing agents, leading to the formation of oxides that compromise the integrity and durability of the metallic substrate. After 24 hours, the specimens immersed in 65% nitric acid showed that in the initial condition and at 80°C they showed some corrosion pits, whereas the one treated at 250°C had slight uniform corrosion. The sample that was baked at 80°C for 72 hours did not show precipitation of the beta phase in a continuous network at the grain boundary, unlike the sample that was baked at 160°C for 72 hours showed precipitation of the beta phase in a network. continues at the grain boundary and consequently intergranular corrosion. The sample that was placed in the oven at 250°C for 72 hours resulted in precipitation of the beta phase inside the grain.

Keywords: Awareness. Corrosion. Alloy AA5083. Aluminum magnesium.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – % de perda de massa das amostras.....46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características físicas do alumínio, aço e cobre 22
Tabela 2 - Classificação das ligas de alumínio..... 27
Tabela 3 - Ligas de alumínio série 5XXX 29
Tabela 4 - Características da liga AA5053 30
Tabela 5 - Composição química da liga AA5083 (% em peso) 31
Tabela 6 – Condição das amostras..... 37
Tabela 7 – Perda de massa antes e após o teste de corrosão em solução de ácido nítrico 65%..... 45
Tabela 8 – Critério para aceitação do material segundo norma ASTM G67..... 46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicações do alumínio no mercado brasileiro 25
Figura 2 – Corrosão por pite..... 34
Figura 3 – Corrosão intergranular..... 34
Figura 4 – Corrosão sob tensão..... 35
Figura 5 – Corrosão por exfoliação..... 36
Figura 6 – Amostras antes do teste em solução de ácido nítrico 65%..... 38
Figura 7 – Forno utilizado..... 38
Figura 8 – Amostra no forno..... 38
Figura 9 – Amostra na condição inicial..... 40
Figura 10 – Amostra sensitizada (80°C)..... 40
Figura 11 - Amostra sensitizada (160°C)..... 40
Figura 12 - Amostra sensitizada (250°C)..... 40
Figura 13 – Amostras em solução de ácido nítrico 65%..... 41
Figura 14 – Após o teste de corrosão..... 41
Figura 15 – Materiais utilizados..... 42
Figura 16 – Início do ataque..... 42
Figura 17 - Microestruturas da amostra na condição inicial antes do ataque. Aumento 500X..... 43
Figura 18 - Microestruturas da amostra mantida no forno a 80°C por 72 horas, antes do ataque. Aumento 500X..... 43
Figura 19 - Microestruturas da amostra mantida no forno a 160°C por 72 horas, antes do ataque. Aumento 500X..... 44
Figura 20 - Microestruturas da amostra mantida no forno a 250°C por 72 horas, antes do ataque. Aumento 500X..... 44
Figura 21 - Microestruturas da amostra na condição inicial, depois do ataque. Aumento 500X..... 44
Figura 22 - Microestruturas da amostra mantida no forno a 80°C por 72 horas, depois do ataque. Aumento 500X..... 44
Figura 23 - Microestruturas da amostra mantida no forno a 160°C por 72 horas, depois do ataque. Aumento 500X..... 45
Figura 24 - Microestruturas da amostra mantida no forno a 250°C por 72 horas, depois do ataque. Aumento 500X..... 45

Sumário

1 INTRODUÇÃO 15

1.1 PROBLEMA 16
1.2 OBJETIVOS 16
1.2.1 Objetivo Geral 16
1.2.2 Objetivos Específicos 16
1.3 JUSTIFICATIVA 16

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS 18
2.1.1 História do alumínio 18
2.1.2 Principais características 20
2.1.3 Propriedades físicas e químicas 23
2.1.4 Obtenção do alumínio 24
2.1.5 Aplicações 25
2.1.6 Aspectos metalúrgicos 27
2.1.7 Sistema de classificação das Ligas 27
2.1.8 Efeitos dos elementos de liga 28
2.1.9 Liga AA5083 31
2.1.10 Influência dos elementos de liga 32
2.1.11 Tipos de Corrosão em Ligas de Alumínio 33
2.1.12 Sensitização 33

3 MATERIAIS E MÉTODOS 38

3.1 MATERIAIS 38
3.2 MÉTODOS 38
3.2.1 Tratamento em forno 39
3.2.2 Preparação das amostras 40
3.2.3 Ensaio de corrosão 41
3.2.3 Micrografia 42

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 44

4.1 METALOGRAFIA 44
4.2 PERDA DE MASSA 46

5 CONCLUSÕES 48

REFERÊNCIAS 49

1 INTRODUÇÃO

A corrosão está presente nos materiais metálicos, especialmente os envolvidos nas atividades industriais. Interações físico-química entre o material e o meio corrosivo causam essa deterioração, onde resultam em problemas nas mais variadas atividades (FRAUCHES-SANTOS; ALBUQUERQUE; OLIVEIRA; ECHEVARRIA, 2014).

Dentre os diversos materiais metálicos existentes, o alumínio e suas ligas, normalmente, possuem boa resistência contra a corrosão e, por isso, são utilizados em diversas aplicações, como: em construções, superestruturas de embarcações, na indústria dos transportes, na indústria de alimentos e química, entre outros. Este bom desempenho geralmente está associado à camada passiva de óxido de alumínio formada natural e rapidamente quando o metal é exposto ao ar em temperatura ambiente (FERRARI, 2011).

Portanto, de acordo com o material selecionado para o desenvolvimento da pesquisa em questão, sabe-se que as ligas referentes da série 5xxx, possuem magnésio como elemento de liga principal e caracterizam-se por não serem tratáveis termicamente, ou seja, não endurecem por tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento, mas sim por solução sólida e encruamento (OGATA, 2017). Além de possuírem excelente soldabilidade, podendo ser soldada por uma variedade de técnicas, incluído por arco elétrico e por resistência, possui também alta resistência à corrosão atmosférica e em água do mar, o que a torna uma escolha popular em aplicações marítimas.

Porém, a liga pode se tornar susceptível ao ataque intergranular, por exfoliação e à corrosão sob-tensão quando é exposta a temperaturas que estão entre 50°C e 200°C por longos períodos de tempo. Este fenômeno é conhecido como sensitização e está largamente associado com a dissolução seletiva da fase Beta (Mg_2Al_3), a qual precipita em rede contínua no contorno de grão durante e exposição à elevadas temperaturas (SARTORI; VEIGA, 2006).

1.1 PROBLEMA

Neste contexto foi considerado como problema de pesquisa desse trabalho acadêmico, identificar se a sensitização na microestrutura da liga AA5083, favorecerá a formação de corrosão quando submetido ao teste em contato com ácido nítrico, na concentração de 65%.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal que irá compor o desenvolvimento desse estudo será comprovar o efeito da sensitização na resistência a corrosão da liga AA5083.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a temperatura de exposição da liga AA5083 e suas alterações nas microestruturas;
- Avaliar as diferentes microestruturas com relação a corrosão causada pela sensitização;
- Contextualizar a história do alumínio no mundo e no Brasil;
- Abordar sobre a composição química e física do alumínio;
- Descrever sobre os benefícios do alumínio para sociedade.

1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo do efeito da sensitização na resistência à corrosão da liga AA5083 em contato com solução de ácido nítrico com concentração de 65% é de suma importância devido à potenciais aplicações industriais e implicação na segurança e durabilidade de estruturas metálicas.

Ao investigar esse tema, será possível obter informações valiosas sobre os mecanismos de corrosão envolvidos, identificar os fatores que influenciam a formação de zonas sensitizadas e desenvolver estratégias de mitigação para minimizar os efeitos da corrosão em componentes feitos com a liga AA5053.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Sendo o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, o alumínio soma cerca de 8,13%. Devido à sua forte afinidade com o oxigênio não é encontrado no estado elemental, e sim na forma combinada como os óxidos ou silicatos (SARTORI, 2004).

O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma massa específica relativamente baixa, alta condutividade térmica e elétrica, e ótima resistência à corrosão. Esta última característica é atribuída devido à formação de um filme duro e fino de óxido de alumínio – a alumina (Al_2O_3), na superfície do metal. Em relação ao seu processamento, as ligas de alumínio são muito dúcteis, apresentando uma boa conformabilidade plástica, característica definida como a capacidade do metal, ou da liga metálica, pode ser processada por deformação plástica sem apresentar defeitos ou fraturas na peça. Como a conformabilidade plástica está intimamente associada ao processo de conformação, a qualidade do metal fica mais precisamente especificada se for determinada a sua capacidade de ser conformado por estampagem, ou por forjamento ou por outro processo específico (BADKE, 2021).

2.1.1 História do alumínio

Embora o alumínio seja o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, ainda é o metal mais jovem usado industrialmente. Por volta de sete milênios atrás, eram produzidos vasos que continham um tipo de barro com oxido de alumínio, que hoje conhecemos como alumina. Trinta séculos depois, egípcios e babilônios fabricaram cosméticos e produtos medicinais que continham alumínio em sua composição. De acordo com a cronologia, sendo utilizado nas civilizações antiga, o metal servia de exemplo de modernidade e sofisticação a vários artefatos. Contudo, nada se sabia durante seus primeiros usos, não da forma como conhecemos atualmente, sendo ele produzido comercialmente há 136 anos (ABAL, 2023).

Já no Brasil, a história da indústria do alumínio surge na segunda década do século XX, porém, permanecendo dependente por vários anos, do alumínio primário. Em 1945, graças às iniciativas do empreendedor Américo Giannetti, foram produzidas

as primeiras toneladas, na Eletro Química Brasileira S/A – Elquisa, que foi a primeira indústria de alumínio primário do Brasil, em Saramenha, no município de Ouro Preto, Minas Gerais (COSTA, 2021).

Sendo assim, de acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (2023), a cronologia da utilização/surgimento do alumínio pode ser separada nas seguintes datas:

1. 6000 a.C.: Os Persas fabricavam potes e recipientes de argila nos quais continham óxido de alumínio (Al_2O_3).

2. 3000 a.C.: Povos do Egito e Babilônia utilizavam argila com para a fabricação de cosméticos, medicamentos e corantes de tecidos.

3. 1809: Humphery Davy, fundiu ferro na presença de alumina, sendo essa descoberta a primeira obtenção do que até o momento mais se aproximava do alumínio.

4. 1821: Um minério avermelhado é descoberto pelo francês P. Berthier, que contém 52% de óxido de alumínio, na França. E então a bauxita é descoberta, o minério mais comum de alumínio.

5. 1825: Consegue-se isolar o alumínio a partir do cloreto de alumínio como é conhecido hoje. Esse grande feito foi realizado pelo físico dinamarquês Hans Christian Oersted.

6. 1855: Na exposição de Paris, é mostrado o primeiro lingote de um metal bem mais leve que o ferro, por Deville. Tornando-se público o processo de para obter o alumínio através de uma redução eletrolítica da alumina dissolvida em banho fundido de criolita. Esse procedimento foi desenvolvido separadamente pelo norte-americano Charles Martin Hall e pelo francês Paul Louis Toussaint Héroult, que o patentearam quase que na mesma hora. Ficando assim conhecido como processo Hall-Heróult permitindo o estabelecimento da indústria global do alumínio.

7. 1945: É produzido o primeiro lingote de alumínio no Hemisfério Sul, em Ouro Preto (MG), na fábrica da Elquisa.

2.1.2 Principais características

Ficando atrás somente do oxigênio e silício, o alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, constituindo 8,13% da sua massa, é o metal mais recente usado na indústria (ALMEIDA, 2015). Devido as suas propriedades como:

- Leveza

Seu peso específico é de cerca de 2,7 g/cm3. Sua massa é aproximadamente 35% da massa do aço e 30% da massa do cobre (SARTORI,2004).

- Resistência mecânica

O alumínio comercialmente puro exibe uma resistência à tração que se aproxima de 90 MPa. Sendo um tanto limitada sua utilização como material estrutural, mas sua resistência mecânica pode ser praticamente dobrada, através do trabalho a frio. Adiciona-se outros metais como elementos de liga, para aumentar sua resistência, tais como: silício, cobre, manganês, magnésio, cromo, zinco, ferro, etc. Além disso, como o alumínio puro, as “ligas não-tratáveis” podem também ter sua resistência aumentada pelo que conhecemos de trabalho a frio e as “ligas tratáveis” que apresentam aumento de resistência através de tratamento térmico, tanto que atualmente algumas ligas podem ter resistência à tração que se aproxima de 700 MPa (ABAL, 2007).

- Resistência à Corrosão

O alumínio é um material extremamente reativo, porém, apresenta uma elevada resistência à corrosão devido à passivação. Basicamente, o alumínio fica mais nobre (menor atividade) por ação desta película óxido, que com uma boa aderência à superfície que impede uma corrosão maior do volume do material. Em contrapartida, a passivação não torna o alumínio imune à corrosão (MARTENDAL, 2016). A menos que seja exposto a uma substância ou condição que destrua essa película de óxido protetor, o metal fica completamente protegido contra a corrosão. Sendo altamente resistente ao tempo, ainda que em atmosferas industriais, que frequentemente

corroem outros metais. Resistente a vários ácidos. Ligas do grupo 5XXX são resistentes a ambientes marinhos. Embora o metal possa ser seguramente usado na presença de certos álcalis moderados com a ajuda de inibidores, devendo ser evitado o contato direto com substância alcalina. (SARTORI, 2004).

Certas ligas de alta resistência são mais suscetíveis à corrosão, mas podem ser protegidas com revestimentos de alumínio puro ou ligas de alta resistência à corrosão. No entanto, é importante evitar o contato direto do alumínio com certos metais em presença de eletrólitos para evitar corrosão galvânica. Quando necessário unir alumínio a esses metais, recomenda-se utilizar materiais isolantes, como pinturas betuminosas. Graças às suas características não tóxicas, o alumínio é amplamente utilizado em equipamentos na indústria alimentícia, sem causar efeitos prejudiciais ao organismo humano, tornando-se uma escolha comum para utensílios domésticos e equipamentos industriais (SARTORI, 2004).

- Condutividade Elétrica

O alumínio destaca-se, dentro das suas aplicações, como o segundo metal mais usado na transmissão de eletricidade, sendo resultado na vantagem em substituir cada vez mais o cobre (NUNES, 2016). A liga AA1350, por exemplo, possui uma condutividade elétrica de aproximadamente 62% do padrão internacional de cobre recozido (IACS). Apesar da condutividade ligeiramente inferior do alumínio em comparação com o cobre, um condutor de alumínio com a mesma resistência pesa apenas metade do que um equivalente de cobre. A adição de elementos de liga pode reduzir a condutividade do alumínio, sendo recomendável utilizar a liga AA1350 sempre que possível em aplicações de condutores elétricos (SARTORI, 2004).

- Condutividade Térmica

O alumínio é essencial na fabricação de utensílios domésticos devido à sua alta condutividade térmica, sendo amplamente utilizado em trocadores de calor em diversas indústrias. Sua refletividade superior a 80% o torna ideal para luminárias e coberturas que reduzem o calor do sol, mantendo edifícios mais frios no verão. Além disso, por ser não magnético e não produzir faíscas, é empregado na proteção de equipamentos eletrônicos e na estocagem segura de substâncias inflamáveis ou

explosivas (SARTORI, 2004).

- Trabalhabilidade

O alumínio oferece uma série de vantagens devido à sua notável facilidade de fabricação e usinagem. Sua maleabilidade permite que seja moldado em uma vasta variedade de formas, sendo capaz de ser fundido por diversos métodos e laminado em espessuras que podem ser mais finas que uma folha de papel. Além disso, suas propriedades permitem que seja estampado, cunhado, repuxado, corrugado, forjado ou impactado, oferecendo flexibilidade para atender a diversas necessidades de design e aplicação. A versatilidade do alumínio se estende também ao seu processo de extrusão, onde praticamente não há limitações para as formas que podem ser alcançadas. Além disso, sua facilidade e rapidez de usinagem são destacadas como fatores cruciais para a produção econômica de peças acabadas em alumínio. Podendo ser fresado, curvado, perfurado e trabalhado de outras maneiras, aproveitando as velocidades máximas que a maioria das máquinas pode atingir. Essa agilidade na usinagem não só contribui para a eficiência da produção, mas também permite que barras e vergalhões de alumínio sejam utilizados em tornos automáticos de alta velocidade. Assim, o alumínio se destaca não apenas por sua versatilidade de formas e processos, mas também por sua capacidade de proporcionar peças acabadas de alta qualidade a um custo competitivo e em tempo hábil. (SARTORI, 2004).

- Reciclabilidade

A reciclagem do alumínio e suas ligas é fundamental devido à sua capacidade única de serem reciclados infinitas vezes sem comprometer suas propriedades. Esse processo não apenas economiza até 95% da energia necessária para produzi-lo a partir da bauxita, mas também reduz significativamente o volume de resíduos, desempenhando um papel crucial na preservação ambiental. Também reduz em 95% a emissão de gases de efeito estufa. Além disso, a reciclagem do alumínio não só agrega valor econômico à sucata, mas também estimula uma economia circular mais sustentável, promovendo benefícios tanto econômicos quanto ambientais. (SARTORI, 2004).

2.1.3 Propriedades físicas e químicas

De acordo com Nascimento (2014), o alumínio reúne características físicas e químicas no qual torna-o um dos mais versáteis materiais utilizados na indústria. Dentre essas características pode-se citar:

- Ponto de fusão de 660°C, o que é baixo quando comparado com o do aço, que é aproximadamente de 1570°C.
- Seu peso específico é de aproximadamente 2,70 g/cm³.
- Possuindo uma invisível e fina camada de óxido que o protege de oxidações posteriores, que proporciona elevada resistência à corrosão.
- Apresenta boa condutividade elétrica (um condutor de alumínio pode conduzir tanta corrente quanto um de cobre).
- Sua condutividade térmica é 4,5 vezes maior do que a do aço e possui uma refletividade acima de 80%, o que facilita utilização em luminárias.
- Como não é um material magnético, o alumínio é, com frequência, utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos e, já que não produz faísca, pode ser utilizado na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas.
- Consiste em um importante elemento de barreira à luz, que é resistente à ação de umidade, oxigênio e microorganismos, fazendo com que a folha de alumínio ser um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens.

A Tabela 1 a seguir, compara as características físicas dos três metais mais utilizados pela sociedade atualmente:

Tabela 1 - Características físicas do alumínio, aço e cobre

Propriedades físicas típicas	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm³)	2,7	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C)	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (Mpa)	70000	205000	110000
Coeficiente de dilatação térmica (L/°C)	23.10-6	11,7.10-6	16,5.10-6
Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica (%IACS)	63	14,5	100

Fonte: ABAL, 2023.

2.1.4 Obtenção do alumínio

Seu processo de produção divide-se na obtenção do alumínio primário e secundário. Onde o alumínio primário é aquele obtido por meio de um processo de redução da alumina, e configura-se pelo elevado consumo de energia elétrica. O alumínio secundário por sua vez, é aquele obtido através do reprocessamento de sucata, que em sua maioria é proveniente da reciclagem, e de sobras de processos de transformação. A produção do alumínio secundário tem crescido em importância, consequência das questões ambientais e ao baixo custo de reprocessamento. Sendo que, a reciclagem consome somente 5% de toda energia elétrica que se consome para produzir o alumínio primário. (ALMEIDA, 2015).

2.1.4.1 Obtenção do alumínio primário

Nos dias de hoje, para obter alumínio em escala industrial, a bauxita passa por um processo de moagem, que é misturada a uma solução de soda cáustica, resultando numa pasta que, aquecida sob pressão e recebe uma nova adição de soda cáustica, dissolvendo-se e formando uma solução que passa por processos de sedimentação e filtragem, que eliminam as impurezas (MÁRTIRES, 2001).

Nota-se então, o resultado do processamento químico da bauxita, que é a alumina, conhecido como processo Bayer. É na refinaria que se realiza essa operação, onde o minério é transformado em alumina calcinada, que consequentemente será utilizada no processo eletrolítico. Por meio de uma reação química, a alumina será precipitada. O material será lavado e secado através de aquecimento para que assim, o primeiro produto do processo de produção do alumínio, o óxido de alumínio de alta pureza, um pó branco e refinado (alumina), seja obtido (MÁRTIRES, 2001).

O principal insumo para a produção de alumínio é a alumina, e transformada em alumínio metálico, pelo processo de redução. Trata-se de um processo eletrolítico através de corrente elétrica descoberto por Paul Louis Toussaint Héroult (Normandia, França) e Charles Martin Hall (Ohio, EUA). Em 1886, esses dois pesquisadores, sem ao menos se conhecerem, inventaram o mesmo procedimento de produção de

alumínio, que é conhecido nos dias de hoje como processo Hall-Hérould (MÁRTIRES, 2001).

2.1.4.2 Obtenção do alumínio secundário (reciclagem)

Pode-se reciclar alumínio infinitas vezes sem que perda durante o processo de reaproveitamento suas, ao contrário de outros materiais. Sua reciclagem é feita a partir tanto de sobras do próprio processo de produção, produtos com vida útil esgotada como latas de bebidas, sucatas, por exemplo (MACHADO; SANTOS; OLIVEIRA, 2011).

Segundo Faria e Lourenço (2023), a reciclagem do alumínio é realizada em cinco etapas:

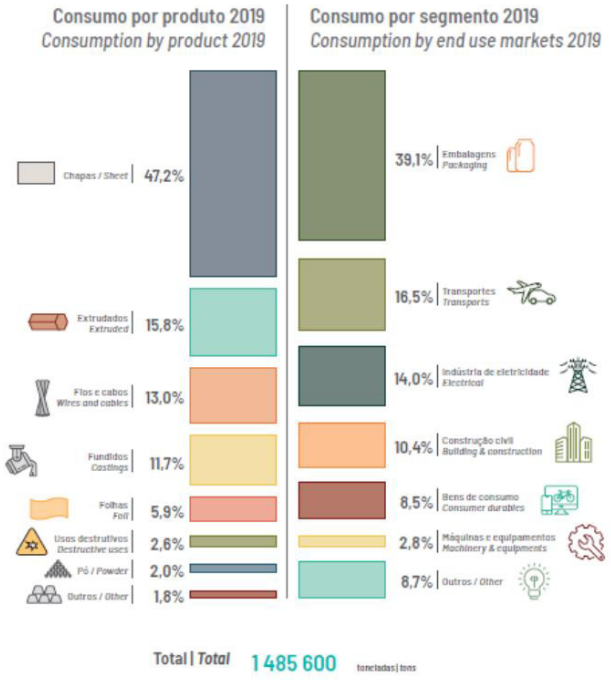
1. Coleta: feita a coleta seletiva dos materiais feitos de alumínio.
2. Separação: Realizado a remoção de impurezas.
3. Compactação: o material é picotado, prensado e compactado em grandes fardos pesados e volumosos, porém fáceis de serem transportados.
4. Fundição: o material já limpo é fundido a 700ºC.
5. Transformação: o alumínio líquido é transformado em lingotes e posteriormente em chapas de alumínio. Sendo estes vendidos para as indústrias fabricantes de produtos e embalagens de alumínio. Dessa maneira, o material retorna a cadeia produtiva.

2.1.5 Aplicações

Suas propriedades, como alta condutividade elétrica como leveza, grande resistência à corrosão e baixo ponto de fusão, possibilitando a produção de diversos itens, tais como ligas metálicas, laminados e extrudados. O uso do alumínio excede o de qualquer outro metal, exceto o do ferro, considerando a quantidade e o valor do metal empregado. É um material importante em múltiplas atividades econômicas, como no tratamento de água e nas indústrias metalúrgica, aeronáutica, farmacêutica e alimentar (CARDOSO; CARVALHO; FONSECA; SILVA; ROCIO, 2011).

No Brasil, entretanto, a maior aplicação ainda está no setor de embalagens, que engloba a indústria farmacêutica e alimentícia, como pode ser observado na Figura 1 a seguir.

Figura 1- Aplicações do alumínio no mercado brasileiro



Fonte: BADKE, 2021.

2.1.6 Aspectos metalúrgicos

Na forma pura, o alumínio é mole e dúctil. No entanto, muitos usos comerciais requerem uma resistência muito maior do que a oferecida pelo alumínio puro. Isto é obtido adicionando-se outros elementos para produzir várias ligas, os quais isoladamente ou em combinações conferem a resistência ao metal. É possível conferir o endurecimento posterior por meios que classificam as ligas em duas categorias: tratáveis e não tratáveis termicamente (SARTORI, 2004).

2.1.6.1 Ligas Não-Tratáveis Termicamente

A resistência inicial das ligas deste grupo depende do efeito de endurecimento de elementos tais como manganês, silício, ferro e magnésio, isoladamente ou em várias combinações. As ligas não-tratáveis termicamente são usualmente designadas

nas séries 1000, 3000, 4000 e 5000 (SARTORI, 2004).

2.1.6.2 Ligas Tratáveis Termicamente

A resistência inicial das ligas é aumentada pela adição de elementos de liga tais como cobre, magnésio, manganês, zinco e silício. Tais elementos, isoladamente ou na forma combinada, formam componentes que apresentam um aumento da solubilidade no alumínio com aumento da temperatura. Este fenômeno permite o endurecimento da liga por meio de tratamentos térmicos adequados (SARTORI, 2004).

2.1.7 Sistema de classificação das Ligas

O sistema de classificação das ligas de alumínio utiliza um código numérico composto por quatro dígitos, separado em duas partes, uma para ligas trabalháveis (1XXX) e outra para ligas fundidas (1XX.X). A diferença entre a classificação das ligas trabalháveis e fundidas está no ponto decimal, que é usado após o terceiro dígito para o caso das ligas fundidas (BADKE, 2021).

Segundo SARTORI (2004), para alumínio não-ligado essa classificação apresenta-se conforme abaixo:

- No grupo 1XXX, alumínio não-ligado de no mínimo 99,00% de pureza; os dois últimos dígitos da designação indicam o grau de pureza da liga.
- O segundo dígito da designação indica modificações dos limites das impurezas. O algarismo “0” indica o alumínio não-ligado que contém impurezas em seus limites naturais ou em que não houve um controle especial de um ou mais elementos presentes como impurezas.
- Já para Ligas de alumínio apresentam-se conforme abaixo:
- O primeiro dígito classifica a série de liga ou o elemento de liga principal.
- Nos grupos 2XXX até 8XXX, os dois últimos dígitos são arbitrários, servindo somente para identificar as diferentes ligas do grupo.
- O segundo dígito caracteriza modificações da liga: o algarismo “0” indica a liga original e os algarismos de 1 a 9 indicam modificações da liga original

De acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) as ligas de alumínio são nomeadas conforme os elementos de ligas adicionados, formando 8

classes distintas (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação das ligas de alumínio

Ligas	Classe
Alumínio 99% ou mais de pureza	1XXX
Cobre	2XXX
Manganês	3XXX
Silício	4XXX
Magnésio	5XXX
Magnésio e Silício	6XXX
Zinco	7XXX
Outros elementos	8XXX

Fonte: ABNT.

2.1.8 Efeitos dos elementos de liga

- Série 1XXX

Alumínio de pureza 99% ou superior, possui muitas aplicações, especialmente nos campos da eletricidade e química. Estas composições caracterizam-se pela excelente resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica, baixas propriedades mecânicas e excelente trabalhabilidade. Aumentos moderados na resistência podem ser obtidos por endurecimento por deformação (encruamento). Ferro e silício são as maiores impurezas (SARTORI, 2004).

- Série 2XXX

As ligas de alumínio da série 2XXX tem como principal elemento de liga o cobre, que permitem elevar resistência à fratura e fadiga em relação as outras ligas de alumínio (MAJEWSKI, 2017).

Estas ligas requerem tratamento térmico de solubilização para obter propriedades mecânicas adequadas – similares e às vezes superiores às do aço doce. Em alguns casos o envelhecimento artificial é utilizado para um posterior aumento das propriedades mecânicas. Este tratamento aumenta o limite de escoamento, com consequente diminuição do alongamento. As ligas na série 2000 possuem resistência à corrosão relativamente limitada em comparação a outras ligas de alumínio e sob certas condições podem ser sujeitas à corrosão intergranular. Assim, estas ligas em formas de chapas são normalmente protegidas (clad) com uma liga de alta pureza ou

uma liga de magnésio silício da série 6000, a qual provê proteção galvânica ao material do núcleo, aumentando muito a resistência à corrosão (SARTORI, 2004).

- Série 3XXX

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

- Série 4XXX

Silício é o elemento de liga principal neste grupo e pode ser adicionado em quantidades suficientes para provocar a redução do ponto de fusão sem produzir fragilização nas ligas resultantes. Por estas razões, ligas de alumínio e silício são usadas para fios de solda e como ligas para brasagem, onde um ponto de fusão mais baixo do que o do metal base é requerido. Muitas ligas nesta série não são tratáveis termicamente. As ligas que contêm quantidades apreciáveis de silício tornam-se cinza escuro quando submetidas à anodização (SARTORI, 2004).

- Série 5XXX

Estas ligas caracterizam-se por ter como elemento de liga principal o magnésio e são ideais para aplicações em diversos segmentos como marinhos, de transportes, aeronáutico, embalagens, construção civil e bens de consumo. Os teores de magnésio para as principais ligas da série 5xxx varia entre 0,5% e 6% em peso (OGATA, 2017).

A seguir, na Tabela 3 é possível identificar a composição química das ligas de alumínio da série 5XXX mais comuns.

Tabela 3 - Ligas de alumínio série 5XXX

Liga	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)
5005	0,3	0,7	0,2	0,2	0,5-1,1	0,1	0,25	-
5049	0,4	0,5	0,1	0,5-1,1	1,6-2,5	0,3	0,2	0,1
5052	0,25	0,4	0,1	0,1	2,2-2,8	0,15-0,35	0,1	-
5083	0,4	0,4	0,1	0,4-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15
5086	0,4	0,6	0,1	0,2-0,7	3,5-4,5	0,05-0,25	0,25	0,15
5182	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	4,0-5,0	0,1	0,25	0,1
5251	0,4	0,5	0,15	0,1-0,5	1,7-2,4	0,15	0,15	0,15
5454	0,25	0,4	0,1	0,5-1,0	2,4-3	0,05-0,2	0,25	0,2
5754	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,3	0,2	0,15

Fonte: OGATA, 2017.

- Série 6XXX

Ligas neste grupo contêm silício e magnésio em proporções aproximadas para formar o precipitado (Mg_2Si), fazendo com que sejam tratáveis termicamente. A principal liga nesta série é a AA6001, uma das mais versáteis tratáveis termicamente. Apesar de oferecerem menor resistência mecânica do que a maioria das ligas dos grupos 2000 ou 7000, as ligas de magnésio e silício possuem boa formabilidade e resistência à corrosão com média resistência mecânica. Ligas neste grupo de tratáveis termicamente podem ser conformadas na têmpera T4 (solubilizada, mas não envelhecida artificialmente) e podem atingir alta resistência na têmpera T6 por envelhecimento artificial (SARTORI, 2004).

- Série 7XXX

Zinco é o elemento de liga principal neste grupo e quando combinado com pequenas quantidades de magnésio resulta em ligas tratáveis termicamente de alta resistência mecânica. 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).

- Série 8XXX

  Usada para ligas que não se enquadram nas séries acima (SARTORI, 2004).

2.1.9 Liga AA5083

2.1.9.1 Utilização: É muito utilizada para fabricar tanques rodoviários, de armazenamento de produtos químicos, silos para estocagem de grãos, componentes estruturais e aplicações marítimas como, por exemplo, casco de barco (SARTORI; SILVA, 2007).

2.1.9.2 Propriedades: A liga AA5083 (Al-4.4Mg-0.7Mn-0.15Cr) é uma liga não tratável termicamente, que possui média resistência mecânica e é conhecida por apresentar excelente resistência à corrosão (SARTORI; VEIGA, 2005).

Na Tabela 4, apresenta-se características físico-química da liga AA5083.

Tabela 4 - Características da liga AA5053

Resistência à corrosão	Muito boa
Resistência Mecânica	Média
Formabilidade	Boa
Soldabilidade	Muito boa
Anodização	Moderado
Usinabilidade	Moderado
Brazabilidade	Pobre

Fonte: ASTM 209M-14.

2.1.9.3 Resistência à corrosão: Uma das características notáveis dessa liga é sua resistência superior à corrosão, especialmente em ambientes marítimos. Isso a torna uma escolha popular para a construção naval e outras aplicações em ambientes marítimos (FARIA; LOURENÇO, 2023).

2.1.9.4 Normas: A liga AA5083 atende a várias normas, como ASTM B209 para chapas de alumínio e ASTM B221 para barras extrudadas de alumínio (FARIA; LOURENÇO, 2023).

Conforme a norma ASTM B209M-21, a liga de alumínio AA5083 possui a composição percentual descrita na Tabela 5 (FERNANDES, 2021).

Tabela 5 - Composição química da liga AA5083 (% em peso).

							Outros		
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Cada	Total	Al
0,4	0,4	0,1	0,4 - 1,0	4,0 - 4,9	0,05 - 0,25	0,25	0,05	0,15	Balanço

Fonte: FERNANDES, 2021.

2.1.10 Influência dos elementos de liga

- Cromo: O cromo é adicionado em quantidades entre 0,1% a 0,3% em ligas de alumínio para controlar o tamanho de grão, prevenir o crescimento e inibir a recristalização durante processos térmicos. Além disso, sua presença em solução sólida e na forma de precipitados finos aumenta levemente a resistência mecânica das ligas e melhora significativamente a resistência à corrosão, especialmente em ligas sujeitas a tensão (SARTORI, 2004).

- Cobre: O cobre é adicionado às ligas de alumínio para aumentar a resistência mecânica e a dureza, por meio de tratamentos térmicos. No entanto, esse elemento diminui a resistência à corrosão em comparação com outros elementos de liga. Em quantidades reduzidas, cerca de 0,15%, o cobre pode melhorar a resistência à corrosão, diminuindo a taxa de penetração do pite (SARTORI, 2004).

- Ferro: O ferro desempenha um papel crucial em ligas de alumínio, formando precipitados de segunda fase que reduzem o tamanho de grão em ligas trabalháveis. Essa característica confere maior resistência mecânica e ductilidade, especialmente em ligas como a AA8006, que mantêm sua integridade estrutural em temperaturas ambiente e elevadas. No entanto, o ferro tem um impacto adverso na resistência à corrosão, tornando-se uma preocupação em aplicações que exigem alta resistência à corrosão. Assim, é fundamental controlar a quantidade de ferro, mantendo-a abaixo de 0,8%, para garantir a adequada resistência à corrosão em ambientes específicos (SARTORI, 2004).

- Magnésio: A máxima solubilidade no alumínio é 17,4%, mas nas ligas trabalháveis atualmente comercializadas não excede 5,5%. O magnésio precipita preferencialmente no contorno de grão na forma de Mg_5Al_3 ou Mg_5Al_8 que são anódicas em relação a matriz de alumínio. Essas fases quando presentes em rede continua em contorno de grão torna o material susceptível a corrosão sob tensão ou esfoliação. O magnésio aumenta a resistência mecânica da liga sem diminuir a ductilidade. Tem influência benéfica na resistência à corrosão, e ligas de Al-Mg têm alta resistência em ambientes marinhos. O magnésio aumenta a resistência à corrosão das ligas de alumínio em soluções alcalinas como óxido de cálcio e carbonato de sódio (SARTORI, 2004).

- Manganês: Tem solubilidade limitada no alumínio, mas mantém em solução sólida quando lingotadas pelo processo Direct Chill. O manganês aumenta a resistência mecânica quando em solução sólida ou na forma de finos precipitados, e aumenta também a temperatura de recristalização. É utilizado no controle do tamanho de grão, pois quando os precipitados estão dispersos na matriz de alumínio retarda a recuperação e previne o crescimento de grão. Tem leve efeito benéfico na resistência à corrosão. Em algumas ligas é adicionado em pequenas quantidades em substituição ao cromo, para obter melhor resistência à corrosão sobre tensão (SARTORI, 2004).

2.1.11 Tipos de Corrosão em Ligas de Alumínio

A corrosão pode ser descrita como a degradação dos materiais metálicos e não metálicos quando estão em contato com o meio ou ambiente, devido às interações mecânicas e/ou químicas (FREITAS; ROMANO, 2019).

O alumínio é um metal extremamente reativo especialmente com oxigênio, o qual produz um óxido, chamado de alumina e que surge com uma imensa variedade de formas cristalográficas. Quando há a presença de água ou umidade pode acontecer o aparecimento de distintas formas dos óxidos hidratados ou hidróxidos, de acordo com as condições (FREITAS; ROMANO, 2019).

- Galvânica

De acordo com Santos (2005) quando uma liga metálica ou metal é eletricamente unido a um material condutor elétrico e imersos em um mesmo eletrólito, ocorre a chamada corrosão galvânica. Três elementos são fundamentais para a ocorrência desse tipo de corrosão:

- Materiais com potenciais de eletrodo divergentes;
- Um meio eletrolítico semelhante entre eles;
- Materiais interligados eletricamente.

A forma mais comum de corrosão galvânica inclui o contato físico, ou uma ligação elétrica, de dois metais distintos que são imersos em um eletrólito. Por isso o nome corrosão bimetálica. A diferença de potencial entre os metais ocasionará em uma corrente elétrica entre eles. No metal considerado como menos condutor à corrosão terá sua taxa ampliada em comparação à sua taxa caso fosse encontrado sozinho imerso no meio. Por outro lado, o material mais condutor apresentará o seu ataque corrosivo reduzido na mesma circunstância. Ou seja, o material menos condutor será o anódico, e o mais condutor, o catódico.

- Uniforme

Acontece na presença de soluções com pH extremos, ou seja, muito alto ou muito baixo. Nessas situações, o óxido que reveste o alumínio fica instável, perdendo sua capacidade protetiva. Para o alumínio, presumisse que esse tipo de corrosão ocorra em meios com pH superior a 9 ou inferior a 3 (MARTENDAL, 2016).

- Por pite

A corrosão por pite geralmente acontece em materiais metálicos passivos que sejam expostos a íons Cl^-. Posteriormente ao início da corrosão, os pites possuem taxas de penetração decrescentes com o tempo de exposição, que são capazes de atingir valores baixos, em razão do preenchimento dos pites com produtos de corrosão pouco solúveis (SCARABOTTO, 2018).

Geralmente, a ocorrência de pites é maior em peças/objetos de Al expostos em condições abrigadas das chuvas, porém sujeitos à contaminantes atmosféricos (SCARABOTTO, 2018). Esse tipo de corrosão é ilustrado na Figura 2.

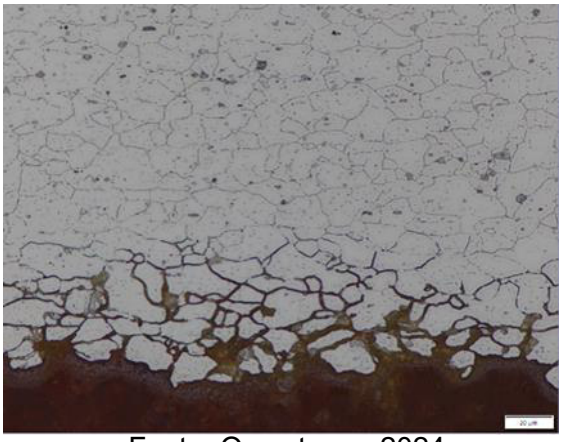
Figura 2 – Corrosão por pite

Fonte: Os autores, 2024.

- Intergranular

A corrosão intergranular é a que ocorre nos contornos de grão do material metálico, tendo como principal característica a perda de suas propriedades mecânicas, resultando na fratura do material quando forem realizados esforços mecânicos. Por esse motivo, quando ocorre a fratura, a corrosão passa a ser conhecida como corrosão sob tensão (do inglês stress corrosion cracking) (SANTOS, 2023). Essa corrosão pode ser ilustrada conforme a Figura 3.

Figura 3 – Corrosão intergranular

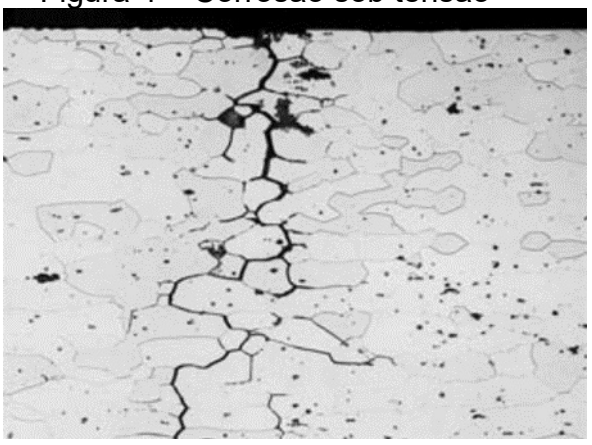


Fonte: Os autores, 2024.

- Sob tensão

Em ligas de alumínio a corrosão sob tensão é praticamente intergranular. Conforme a teoria eletroquímica é essencial uma condição no contorno de grão que faz com que ele torne-se anódico em comparação com as outras regiões da microestrutura, fazendo com que a corrosão propague-se no contorno de grão. A vulnerabilidade à corrosão intergranular é uma pré-condição para a susceptibilidade a corrosão sob tensão. Além disso, para que seja possível ocorrer esse tipo de corrosão é necessário uma tensão e um eletrólito (SILVA; SARTORI, 2007). A Figura 4 a seguir, ilustra uma microestrutura onde esse tipo de corrosão é encontrada.

Figura 4 – Corrosão sob tensão



Fonte: SARTORI, 2024.

- Exfoliação

Sendo um tipo de corrosão intergranular, a corrosão por exfoliação se propaga paralelamente a superfície do metal. Ocorrendo preferencialmente em materiais com grãos alongados (BARBOZA, 2021). As ligas de alumínio que contiver magnésio com peso superior a 3% podem apresentar a corrosão por exfoliação. Para que seja possível controlar o grau de susceptibilidade é utilizado um tratamento metalúrgico especial. A susceptibilidade à esse tipo de corrosão está associada com a agressividade da atmosfera e a estrutura do material. O material fica susceptível a esse tipo de falha em condições onde ocorre a precipitação em rede contínua da fase beta no contorno de grão. Além disso, a corrosão por exfoliação se desenvolve velozmente em meios que contém cloretos, como o caso de atmosferas marítimas (SILVA; SARTORI, 2007). A corrosão por exfoliação tem como principal característica, ser

encontrada em forma de escamas, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Corrosão por exfoliação

Fonte: SARTORI, 2024.

2.1.12 Sensitização

As ligas de alumínio magnésio (5XXX) que possuem menos que 3% de magnésio são extremamente resistentes à corrosão intergranular. Entretanto, as ligas de alumínio magnésio que contém acima de 3% de magnésio oferecem pouca resistência à este tipo de corrosão, pois permitem a ocorrência do surgimento da sensitização (SARTORI; VEIGA, 2005).

Portanto, quando essas ligas são exposta à temperaturas no range de 50°C a 200°C por períodos estabelecidos como suficientemente longos, ocorre o fenômeno citado anteriormente, conhecido como sensitização. Um fenômeno que está diretamente associado com a dissolução seletiva da fase Beta (Mg2Al3), em rede contínua no contorno de grão, ou seja, quando uma liga da série 5XXX sofre solidificação as partículas de magnésio ficam em solução sólida, mas quando são aquecidas precipitam, indo diretamente para os contornos de grão (SARTORI; VEIGA, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

- Quatro amostras da Liga AA5083;
- Solução de ácido nítrico com concentração de 65%;
- Quatro béqueres de 100 ml;
- Balança analítica;
- Forno para aquecimento das peças, marca Herma, modelo TH2231P-103-000.

3.2 MÉTODOS

Para esse estudo foram utilizadas quatro amostras em diferentes condições, sendo todas laminadas a quente. A primeira amostra permaneceu em seu estado inicial, sem receber nenhum tipo de tratamento, enquanto as outras amostras foram tratadas por 72 horas, porém em temperaturas diferentes, à 80°C, 160°C e 250°C, conforme ilustrado na Tabela 6.

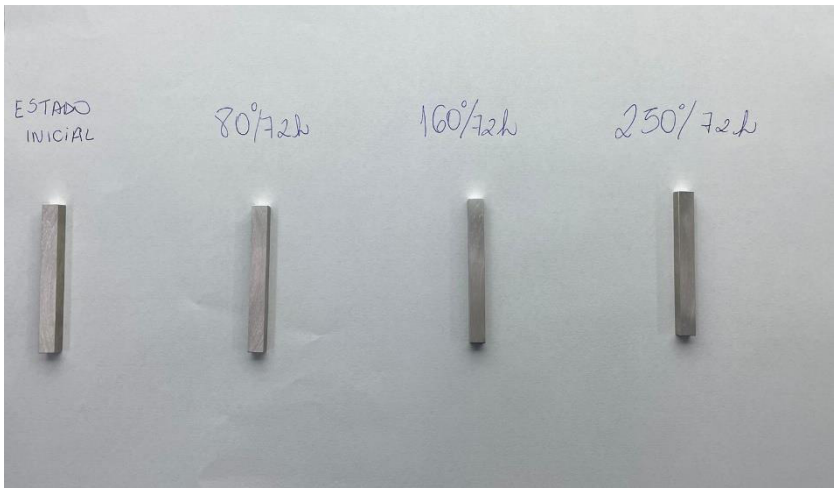
Tabela 6 – Condição das amostras.

Amostras	Condição da amostra	Ataque em Ácido Nítrico 65%
1	Como recebida	Sim
2	Tratada 80°C/72h	Sim
3	Tratada 160°C/72h	Sim
4	Tratada 250°C/72h	Sim

Fonte: Os autores, 2024

As quatro amostras foram submetidas ao ensaio corrosivo em solução de ácido nítrico 65% por 24 horas e posteriormente análise micrográfica. A Figura 6 ilustra as amostras antes do teste.

Figura 6 - Amostras antes do teste em solução de ácido nítrico 65%.



Fonte: Os autores, 2024.

3.2.1 Tratamento em forno

O tratamento de sensitização foi realizado para simular uma condição de susceptibilidade à corrosão intergranular, servindo de comparação para as amostras retiradas após laminação à quente.

As amostras que foram submetidas a temperaturas de 80°C,160°C e 250°C, ambas por 72 horas cada tiveram como objetivo provocar a precipitação da fase beta em rede contínua em contorno de grão (sensitização). As Figuras 7 e 8 ilustram o tipo de forno utilizado e as respectivas amostras dentro em seu interior.

Figura 7 – Forno utilizado

Fonte: Os autores, 2024.

Figura 8 – Amostra no forno

Fonte: Os autores, 2024.

3.2.2 Preparação das amostras

- Os corpos-de-prova foram preparados nas seguintes dimensões: 50 x 5 x 6 mm. A dimensão de 50 mm deve ser paralela ao sentido de laminação.
- As três dimensões dos corpos-de-prova foram medidas para cálculo da área de cada corpo-de-prova.
- Após o cálculo da área, foi calculado o volume de ácido nítrico necessário para a imersão de cada corpo-de-prova na proporção de 3 mL/cm^2 (30 L/m^2).
- Os corpos-de-prova foram imersos em uma solução 5% de NaOH à 80ºC por 1 minuto (para aquecer esta solução utilizou-se uma chapa aquecedora) e, em seguida, foram lavados com água destilada.
- Após a lavagem, os corpos-de-prova foram imersos em ácido nítrico concentrado (%m/v = 65%) por 1 minuto e em seguida foram lavados novamente com água destilada.
- Os corpos-de-prova foram pesados.
- Os corpos-de-prova foram imersos no ácido nítrico por 24 horas, sendo que a temperatura foi mantida à 30 +/- 0,1ºC.
- Após as 24 horas, os corpos-de-prova foram removidos do ácido e lavados com água destilada.
- Após a lavagem com água, passou-se uma escova de cerdas macias sobre os corpos-de prova e, novamente, os corpos-de-prova foram lavados com água destilada.
- Em seguida, os corpos-de-prova foram pesados.
- Foi então calculada a perda de massa por unidade de área (expressa em mg/cm^2).
- Por último, foi realizado um exame metalográfico nos corpos-de-prova. As Figuras 9, 10, 11 e 12 mostram o peso inicial das amostras.

Figura 9 – Amostra na condição inicial

Fonte: Os autores, 2024.

Figura 10 – Amostra sensitizada (80°C)

Fonte: Os autores, 2024.

Figura 11 – Amostra sensitizada (160°C)

Fonte: Os autores, 2024.

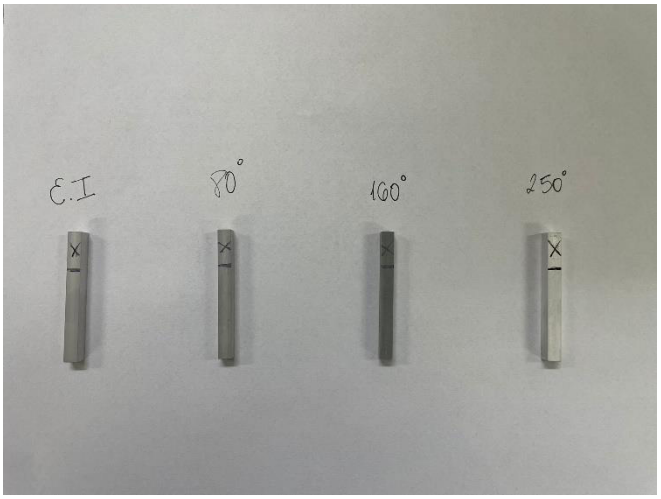
Figura 12 – Amostra sensitizada (250°C)

Fonte: Os autores, 2024.

3.2.3 Ensaio de corrosão

Após a pesagem inicial, os corpos de prova foram colocados em quatro béqueres separados contendo ácido nítrico 65% em temperatura ambiente, sendo que a quantidade de solução foi o suficiente para cobrir as amostras. A Figura 13 ilustra o início do teste e a Figura 14 mostra os corpos-de-prova após o teste de corrosão.

Figura 13 – Amostras em solução de ácido nítrico 65%



Fonte: Os autores, 2024.

Figura 14 – Após teste de corrosão

Fonte: Os autores, 2024.

3.2.3 Micrografia

3.2.3.1 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas para a micrografia, e os procedimentos foram:

- Corte das amostras
- Embutimento;
- Lixamento e polimento
- Ataque em ácido fosfórico 40% a 35°C

3.2.3.2 Ataque metalográfico

As amostras foram preparadas para o ataque químico, os procedimentos para realização do ensaio foram:

- Em um becker de vidro foi adicionado 60 ml de água destilada;
- Com o auxílio de uma bureta foi adicionado 40 ml de ácido fosfórico;
- Foi feito a mistura da solução;
- Após o fim da preparação da solução foi realizado o ataque químico com a imersão das amostras por 180 segundos. A Figura 15 e 16 ilustra os materiais que foram utilizados e o início do procedimento;

Figura 15 – Materiais utilizados

Fonte: Os autores, 2024.

Figura 16 – Início do ataque

Fonte: Os autores, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Metalografia

Usando a técnica metalográfica foi possível observar a microestrutura de quatro corpos de provas antes e após o teste com ácido nítrico para verificar sua resistência à corrosão.

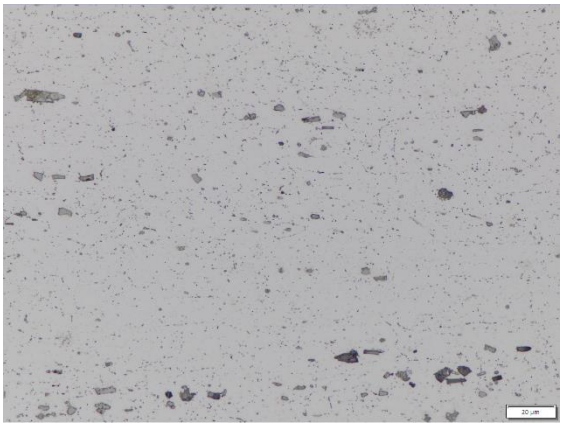
As Figuras 17,18, 19 e 20 ilustram a microestrutura dos materiais antes de iniciar o teste com ácido nítrico. Com base na Figura 17 observa-se que na condição inicial, onde o material foi somente laminado a quente, sem receber nenhum tratamento apresenta alguns precipitados de Mg_2Al_3 no contorno de grão, porém de forma não contínua.

A Figura 18 ilustra a microestrutura após o material permanecer no forno a 80°C por 72 horas, nesse caso por ter sido tratada a uma temperatura consideravelmente baixa, não houve alteração da microestrutura.

No terceiro corpo de prova, após o material permanecer no forno a 160°C por 72 horas, houve tempo e condições para ocorrer grande precipitação da fase beta em rede contínua em contorno de grão, conforme observado na Figuras19.

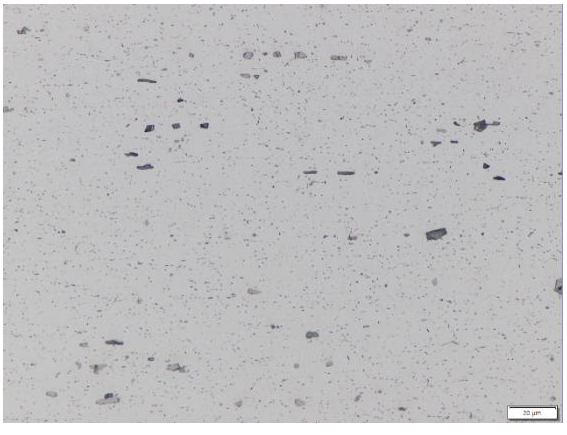
Por último a Figura 20 ilustra a microestrutura após o material permanecer no forno a 250°C por 72 horas em que resultou na precipitação da fase beta no interior do grão e com tamanho um pouco maior.

Figura 17 – Microestruturas da amostra na condição inicial antes do ataque. Aumento 500X.



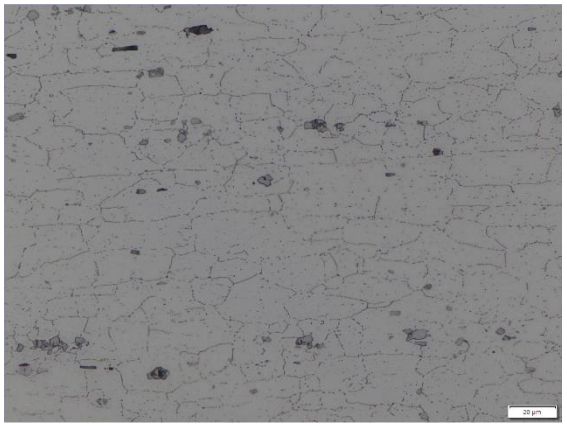
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 18 – Microestruturas da amostra mantida no forno a 80°C antes do ataque. Aumento 500X.



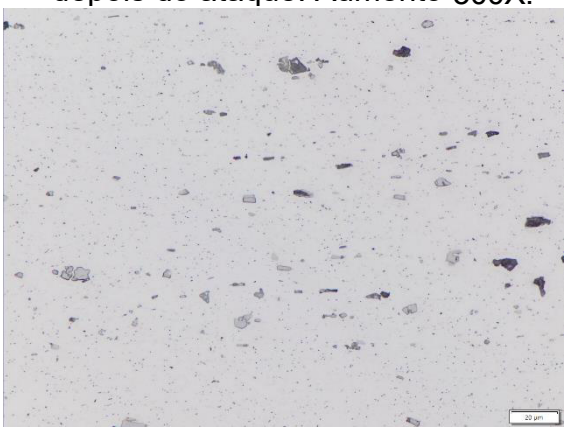
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 19 – Microestruturas da amostra mantida no forno a 160°C por 72 horas, antes do ataque. Aumento 500X.



Fonte: Os autores, 2024.

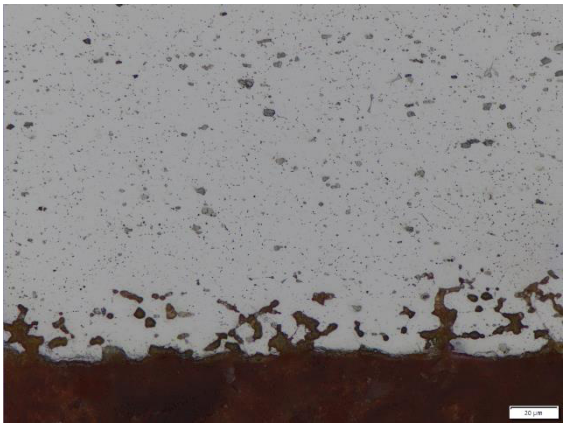
Figura 20 – Microestruturas da amostra mantida no forno a 250°C por 72 horas, depois do ataque. Aumento 500X.



Fonte: Os autores, 2024.

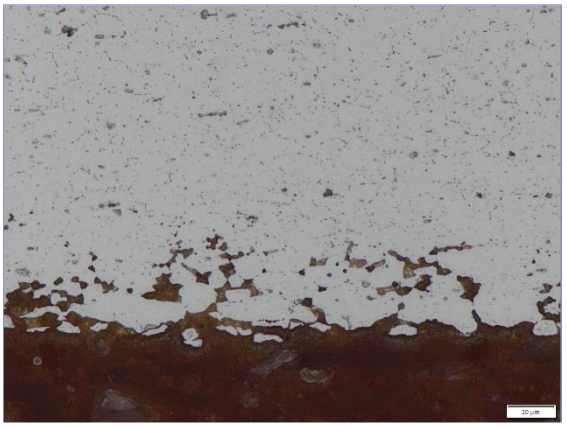
Após o teste com ácido nítrico com concentração de 65%, as microestruturas apresentaram diferentes tipos de corrosão. De acordo com a Figura 21 e 22, o corpo de prova que foi analisado na condição inicial (sem receber nenhum tratamento) e o que foi tratado a 80°C por 72 horas apresentaram pequenos pites em sua microestrutura. Em contraste o material laminado à quente, tratado a 160°C por 72 horas e sensitizado, apresentou forte processo de corrosão intergranular, conforme ilustrado na Figura 23. No caso do último corpo de prova ilustrado na Figura 24, o material tratado a 250°C por 72 horas, que havia apresentado precipitação da fase beta no interior do grão, obteve leve corrosão uniforme, após o teste.

Figura 21 – Microestruturas da amostra em condição inicial, depois do ataque. Aumento 500X.



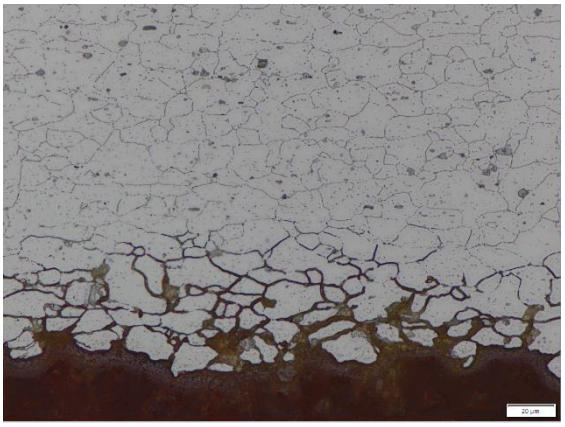
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 22 – Microestruturas da amostra mantida no forno a 80°C por 72 horas, depois do ataque. Aumento 500X.



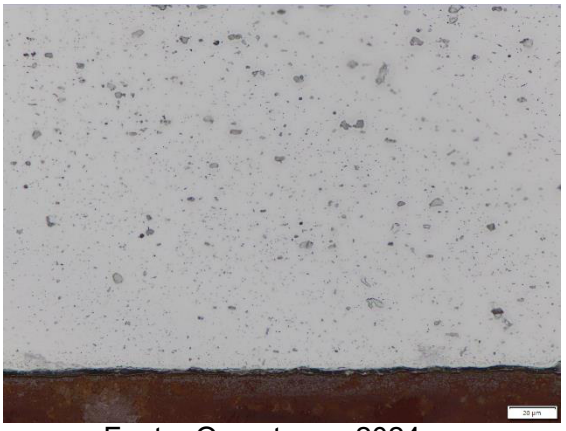
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 23 – Microestruturas da amostra mantida no forno a 160°C por 72 horas, depois do ataque. Aumento 500X.



Fonte: Os autores, 2024.

Figura 24 – Microestruturas da amostra mantida no forno a 250°C por 72 horas, depois do ataque. Aumento 500X.



Fonte: Os autores, 2024.

4.2 Perda de massa

As amostras foram pesadas antes e após o ensaio de corrosão utilizando uma balança analítica para calcular a perda de massa, A Tabela 7 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 7 – Perda de massa antes e após o teste de corrosão em solução de ácido nítrico 65%

Condição da amostra	Peso Antes do teste (g)	Peso Após o teste (g)	Área do CP (cm²)	Perda de massa	Unidade de perda de massa (mg/cm²)	Perda de massa (%)
Inicial	4,03899	4,00723	11,6	0,03176	2,7379	0,79
80°C/72h	4,06612	4,00720	11,6	0,05892	5,0793	1,45
160°C/72h	4,03836	3,54397	11,6	0,49439	42,6198	12,24
250°C/72h	4,04585	4,03387	11,6	0,01198	1,0328	0,30

Fonte: Os autores, 2024.

Fórmula para o cálculo da perda de massa:

$$\left[\frac{Mo - M}{Acp}\right] \times 1000 = PM$$

Mo – massa inicial (g)

M – massa final (g)

Acp – área do corpo-de-prova (cm^2)

PM – perda de massa por unidade de área (mg/cm^2)

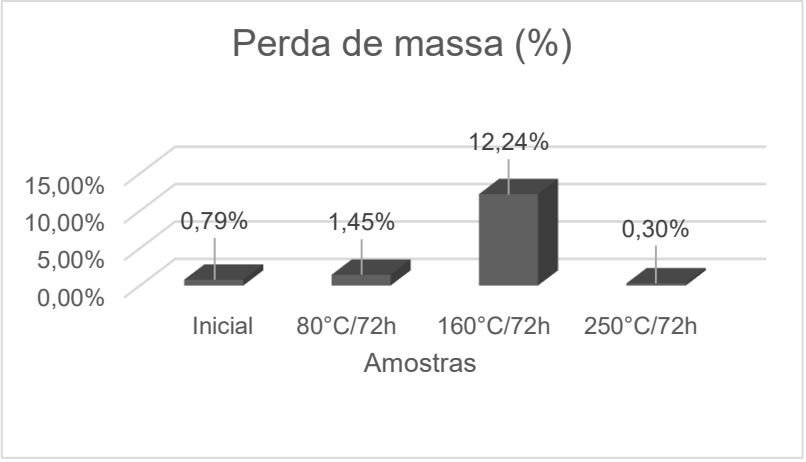
A norma ASTM G67 *"Standard Test Method for Determining the Susceptibility to Intergranular Corrosion of 5XXX Series Aluminum Alloys by Mass Loss After Exposure to Nitric Acid (NAMLT Test)"* padroniza um método de teste que fornece uma medida quantitativa da suscetibilidade à corrosão intergranular de ligas de alumínio magnésio. A Tabela 8 ilustra as faixas de perda de massa e sua relação com a corrosividade da amostra.

Tabela 8 - Critério para aceitação do material segundo norma ASTM G67

Perda de massa (mg/cm^2)	Resultado	Status
1 – 15	Material resistente à corrosão intergranular	Liberado
16 – 24	Material com resistência a corrosão intermediária	Suspeito
25 – 75	Material pouco resistente à corrosão intergranular	Rejeitado

O Gráfico 1 ilustra a perda de massa das amostras testadas em percentual

Gráfico 1 – % de perda de massa das amostras



Fonte: Os autores, 2024.

5 CONCLUSÕES

- A amostra laminada a quente apresentou alguns precipitados de Mg_2Al_3 no contorno de grão, porém de forma não contínua e após teste e após teste com ácido nítrico observou alguns pites de corrosão;
- A amostra submetida a temperatura de 80ºC por 72 horas, apresentou alguns precipitados de Mg_2Al_3 no contorno de grão, porém de forma não contínua, e após teste com ácido nítrico observou alguns pites de corrosão;
- Já a amostra mantida a 160ºC por 72 horas apresentou completa precipitação da fase Mg_2Al_3 em rede contínua em contorno de grão, e após teste com ácido nítrico resultou em corrosão intergranular;
- Por fim, na amostra mantida a 250ºC por 72 horas, a precipitação da fase beta ocorreu no interior dos grãos com tamanho maior, e após teste com ácido nítrico apresentou uma corrosão uniforme bastante superficial.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Características químicas e físicas**. Disponível em: https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/. Acesso em: 23 de fevereiro de 2024.

ALBUQUERQUE, M.A; ECHEVARRIA, A.; FRAUCHES-SANTOS, C; OLIVEIRA M.C.C. **A Corrosão e os Agentes Corrosivos**, 2013. Disponível em: https://rvqsub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/490/422. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

ALMEIDA, Diego Tolloti. **Analise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) da liga de alumínio 5182-O**, 2015. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/132699. Acesso em: 15 de dezembro de 2023.

ALVARENGA, I. S; TIBURCIO, G.G. **As novas aplicações do alumínio na indústria automobilística**, 2017. Disponível em: http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/5292/1/Gabriel%20G.%20Tiburcio%20e%20Isabela%20da%20S.%20Alvarenga.pdf. Acesso em: 22 de janeiro de 2024.

BADKE, Julia Brescovici. **Caracterização experimental em chapas de alumínio da classe 5052-H32**, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22658. Acesso em 31 de janeiro de 2024.

BALBOA, Rocky. **Rocky Balboa (2006): o discurso que salvou a minha vida**. Disponível em: https://www.jusbrasil.com.br/noticias/rocky-balboa-2006-o-discurso-que-salvou-a-minha-vida/811643795. Acesso em: 19 de abril de 2024.

BARBOZA, Wanessa das Graças. **Comportamento em corrosão da liga 2098-T351**, 2021. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/7374/1/materiais_2021_2_wanessadasgracasbarboza_caracterizacaoecomportamentoemcorrosao.pdf. Acesso em: 18 de novembro de 2023.

CARDOSO, J.G.R; CARVALHO, P.S.L; FONSECA, P.S.M; SILVA, M.M; ROCIO, M.A.R. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências**, 2011. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2499/3/A%20BS%2033%20A%20ind%c3%bastria%20do%20alum%c3%adnio_estrutura%20e%20tend%c3%aancias_P.pdf. Acesso em 01 de abril de 2024.

COSTA, Leonardo Vieira. **A reciclagem do alumínio: caminho para o desenvolvimento sustentável**, 2022. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/4280/15/MONOGRAFIA_ReciclagemAluminioCaminho.pdf. Acesso em: 12 de fevereiro de 2024.

FARIA, E.C.M; LOURENÇO, M.N. **Estudo da influência da microestrutura na resistência da liga AA5083 em contato com solução de cloreto de sódio 3,5%,** 2023. Disponível em: pdf (Biblioteca - Fatec). Acesso em: 15 de abril de

2024.

FERNANDES, Yasmin Tavares. **Estudo do crescimento de grão da liga AA5083**, 2021. Disponível em: https://repositorio.unifesp.br/server/api/core/bitstreams/6de469a9-67c2-4cfe-8695-0947be7b8a2a/content. Acesso em: 04 de abril de 2024.

FERRARI, Jean Vicente. **Estudo da corrosão localizada da liga de alumínio 7475-T761**, 2011. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-01112011- 112909/publico/Tese_Jean_Ferrari.pdf. Acesso em: 21 de outubro de 2023.

FREITAS, E. J; ROMANO, M.A. **Processo de corrosão e passivação do alumínio**. Disponível em: https://www.oswaldocruz.br/revista_academica/content/pdf/Edicao30_Elias_Junior_de_Freitas.pdf. Acesso em: 12 de dezembro de 2023.

MACHADO, C.T.S; SANTOS, V.S; OLIVEIRA, E.A.A.Q. **A reciclagem de alumínio**, 2011. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2011/anais/arquivos/RE_0576_0859_01.pdf. Acesso em 15 de abril de 2024.

MAJEWSKI, Marcelo. **Compósitos processados via RTM em de liga de alumínio**, 2017. Disponível em: https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UNSP_f22ffe9d977d8d87d0ed4e68c523ac00. Acesso em 23 de março de 2024.

MARTENDAL. **Alumínio tem problemas com corrosão**, 2016. Disponível em: http://engenheirodemateriais.com.br/2016/10/12/aluminio-nao-tem-problemas-comcorrosao-certo-ouerrado/. Acesso em: 18 de novembro de 2023.

MÁRTIRES, Raimundo Augusto Corrêa. **Alumínio – Balanço Mineral Brasileira 2001**. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-aluminio/@@download/file/balanco_mineral_003_2001.pdf. Acesso em: 01 de Abril de 2024.

NASCIMENTO, Luana Vicente do. **Efeito da temperatura de recozimento sobre as propriedades mecânicas e microestrutura da liga AA5182**, 2014. Disponível em: https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2014/MEM14010.pdf. Acesso em: 16 de abril de 2024.

NUNES, Ana Gabriele Perreira. **O uso de anteliga A1-4B para o aumento da condutividade elétrica do alumínio líquido**, 2016. Disponível em: https://bdtd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/828. Acesso em: 14 de março de 2024.

OGATA, Cínthia Toshimi. **Correlações entre microestrutura de ligas de alumínio a série 5XXX**, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9456. Acesso em: 10 de abril de 2024.

SANTOS, Alisson Lemos dos. **Requisitos e restrições da utilização de fluidos de corte na usinagem de liga de alumínio 7075 quanto a propagação de corrosão intergranular**. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/31778/1/propagacaodecorrosaointergranular_FINAL.pdf. Acesso em: 28 de abril de 2024.

SANTOS, Frederico Guilherme Dantas dos. **Avaliação da susceptibilidade à corrosão galvânica em aços inoxidáveis**. Disponível em: http://hdl.handle.net/1843/CMPS-6WMEEP. Acesso em: 28 de abril de 2024.

SARTORI, Alexandre**. LIGAS DE ALUMÍNIO Características – Classificações – Aplicações**, 2004. Disponível: Apostila pdf. Acesso em: 18 de novembro de 2023

SARTORI, Alexandre; SILVA, B. **Influência do Tempo de Exposição e Temperaturas Elevadas na Microestrutura da Liga AA5083**, 2007. Disponível em: https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/influncia-do-tempo-de-exposio-e-temperaturas-elevadas-na-microestrutura-da-liga-aa5083. Acesso em: 31 de abril de 2024.

SARTORI, A; VEIGA, J. **Determinação da susceptibilidade à corrosão intergranular, para ligas 5XXX,** 2005**.** Disponível: Pdf**.** Acesso em: 20 de novembro de 2023.

SCARABOTTO, Mônica. **ESTUDO DACORROSÃO NAS LIGAS DE ALUMÍNIO 3105 E 5052**. Disponível em: Estudo da corrosão nas ligas de alumínio 3105 e 5052 - CORE Reader. Acesso em: 28 de abril de 2024.