

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**Análise da influência do recozimento e da estabilização na
resistência a corrosão da liga Al AA 5052.**

Júlio César Geraldi

Leandro de Mello Ferreira

PINDAMONHANGABA – SP

2018

Júlio César Geraldi
Leandro de Mello Ferreira

**Análise da influência do recozimento e da estabilização na
resistência a corrosão da liga Al AA 5052.**

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

Área de Concentração: Processos Metalúrgicos

Orientador: Prof^a. Dra. Ana Beatriz R. Moreira
Abrahão.

Co-orientador: Prof^a Dra. Leidi Lili Gonçalves

PINDAMONHANGABA – SP

2018

G311a

Análise da influência do recozimento e da estabilização na resistência a corrosão da liga Al AA / Júlio César Geraldi; Leandro de Mello Ferreira / FATEC Pindamonhangaba, 2018.
46f.: il.

Orientadora Prof.^a Dr.^a Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão
Co-orientador: Prof.^a Dr.^a Leidi Lili Gonçalves
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2018

1. Corrosão. 2. Alumínio 3. Recozimento. 4. Têmpera.
5. Estabilização. 6. Potenciodinâmico. I. Geraldi, Júlio César.
II. Ferreira, Leandro de Mello. III. Abrahão, Ana Beatriz Ramos
Moreira. IV. Gonçalves, Leidi Lili. V. Título.

CDD 620

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO RECOZIMENTO E
DO ENCRUAMENTO NA RESISTÊNCIA A
CORROSÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA5052**

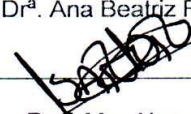
**LEANDRO DE MELLO FERREIRA
JÚLIO CÉSAR GERALDI**

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

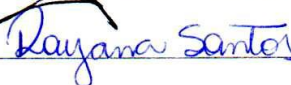
Comissão Examinadora



Orientadora – Prof^a. Dr^a. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão



Membro – Prof. Me. Alexandre Sartori



Membro - Me. Rayana Marcela Izidoro da Silva Santos

Pindamonhangaba, 11 de dezembro de 2018.

Dedicatória

A Deus por toda determinação dada. Aos amigos João Marcus e Sandra por toda ajuda e incentivo dado em todos os momentos. Ao amigo Júlio César que, com seu bom-humor, proporcionou um trabalho tranquilo e descontraído. Ao Sr. Clóvis e a Dona Sônia por ter aturado horas de trabalho em sua residência e pelos jantares maravilhosos. Aos amigos Isabela e Marcos Paulo por toda atenção e apoio para execução desse trabalho. À professora Doutora Ana Beatriz por toda paciência e carinho. A minha namorada e aos meus familiares que nunca deixaram de acreditar. E a todos que direta ou indiretamente ajudaram na realização desse projeto.

Leandro de Mello Ferreira

Aos meus colegas de classe, em especial a João Marcus e Sandra, que sempre mantiveram aceso o meu foco e a minha determinação para a conclusão desse projeto. A minha família, minha esposa e meu filho, que sempre me apoiaram e nunca me deixaram desistir. Em especial meus sogros, Clóvis e Sônia Ribeiro, por todo incentivo e apoio durante essa caminhada árdua. Aos amigos Isabela e Marcos Paulo por toda atenção e apoio para execução desse trabalho. À professora Doutora Ana Beatriz por toda paciência e carinho. Ao meu incansável parceiro de batalha Leandro por ajudar a deixar essa jornada mais divertida e alegre. A Deus que sempre se manteve ao meu lado. E a todos que direta ou indiretamente ajudaram na realização desse projeto.

Júlio César Geraldi

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	12
1.2.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1. Alumínio e suas ligas	13
2.1.1 Nomenclatura das ligas	16
2.1.2 LIGAS DA SÉRIE 5XXX	17
2.2. Liga AA5052	18
2.3. Tratamentos Térmicos em Ligas de Alumínio	19
2.3.1. Têmperas	19
2.3.1.1. Têmpera “O” (recozimento)	19
2.3.1.2. Têmpera “H” (Encruamento)	20
2.2 Corrosão	21
2.2.1 Corrosão em ligas de Alumínio	23
2.2.2 Corrosão por pite	23
2.2.3 Corrosão por Esfoliação	26
2.2.4 Corrosão Intergranular	26
2.2.5 Corrosão sob tensão	26
2.3. Acompanhamento da corrosão	27
2.3.1 Método Potenciodinâmico	27
2.3.2. Ensaio acelerado em câmara Salina	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. Materiais	30
3.1.1. Amostras da liga AA 5052	30
3.2. Métodos	30
3.2.1. Ensaio em câmara salina	30
3.2.1.1. Preparo das amostras	30
3.2.1.2. Ensaio e tempo de duração	31
3.2.2. Ensaio potenciodinâmico	31
3.2.2.1 Preparo das amostras	31
3.2.2.2. ensaio	32
3.2.2.3. Cálculo da taxa de corrosão	33

3.3. Caracterização metalográfica.....	33
4. Resultados e Discussão	35
4.1. Ensaio de exposição em câmara Salina	35
4.1.1. Análise de perda de massa.....	35
4.1.2. Microscopia das amostras.....	36
4.2. POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO E CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA	39
4.2.1. Taxa de corrosão	41
4.3. Macroscopia das amostras.....	42
5. Conclusão	43
6. REFERÊNCIAS.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Processo de recristalização dos grãos.....	20
Figura 2. Equações das reações	25
Figura 3. Esquema ilustrativo de corrosão por pite.....	25
Figura 4. Curvas do modelo polarização.....	27
Figura 5. Curva do modelo potencioestático.....	29
Figura 6. Corpo de prova para realização do ensaio potenciodinâmico AA5052	31
Figura 7. Lixa rotativa de bancada	32
Figura 8. Equipamento potencioestato da marca AUTOLAB	32
Figura 9. Estereoscópio Olympus SZ2-ET.....	34
Figura 10. Microscópio ZEISS.....	34
Figura 11. Liga AA5052 H32 inicial-500x	36
Figura 12. Liga AA5052 H32 após o ensaio em câmara salina – 500x.....	37
Figura 13. Liga AA5052 O inicial - 500x	37
Figura 14. Liga AA5052 O após o ensaio por imersão – 500x	38
Figura 15. Curva de potencial de corrosão referentes às amostras da liga de alumínio AA5052 encruada (H) e recozida (O).....	39
Figura 16. Curvas de Polarização referentes às amostras da liga de alumínio AA5052 encruada (H) e recozida (O).....	40
Figura 17. Liga AA5052 H32 após o ensaio potencioestático.....	42
Figura 18. Amostras da liga AA5052 O após a o ensaio.....	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades do Alumínio AA1XXX.....	13
Tabela 2. Alumínio e suas ligas	14
Tabela 3. Composição das ligas de Alumínio.....	17
Tabela 4. Composição química das ligas do grupo 5XXX.....	18
Tabela 5. Composição química da liga AA 5052	18
Tabela 6. Características da corrosão química e eletroquímica.....	22
Tabela 7. Tipos de corrosão	22
Tabela 8. Composição química da liga AA5052.....	30
Tabela 9. Área e massa das amostras iniciais	31
Tabela 10. Análise da perda de massa e taxa de corrosão	35

FERREIRA, Leandro de Mello; GERALDI, Júlio César. **Análise da influência do recozimento e da estabilização na resistência a corrosão da liga Al AA 5052**. 2018 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos, Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, 2018.

Resumo

Quando a redução de consumo e a preservação do meio ambiente tornam-se requisitos imprescritíveis para o segmento da indústria no mundo, o alumínio e suas ligas aparecem como uma boa opção. As ligas de alumínio também conhecidas como ligas de alumínio não ligado, possuem entre 99,0% e 99,5% de alumínio, sendo o remanescente, essencialmente composto de ferro e silício. É possível a obtenção do metal com uma pureza elevada, acima de 99,5% de alumínio, chegando até 99,9% de pureza, a um custo muito mais elevado, que é utilizado quando se faz necessário uma alta condutividade elétrica ou alta resistência à corrosão. A utilização desses materiais, substituindo o aço e o ferro fundido, promove grandes benefícios com a redução de peso do componente, com o aumento da resistência à corrosão e a perspectiva de reciclagem. Entretanto, em ligas de alumínio a corrosão se desenvolve mais facilmente em contato com elementos menos eletronegativos, tais como ouro, cobre, cloro, níquel e ferro. Algumas substâncias presentes nos alimentos, como por exemplo, pigmentos e íons metálicos, também são aceleradores de corrosão. Tratamentos térmicos podem especificamente mudar propriedades de ligas de metais podendo melhorar ou piorar algumas das propriedades mecânicas e comportamento frente á ambientes corrosivos. Neste sentido este trabalho visou o estudo da influência da estabilização e recozimento da liga de alumínio AA5052 na resistência de corrosão em meio salino. Com a utilização da câmara salina foi possível analisar a perda de massa e fazer a caracterização por microscopia das amostras, já com o a utilização do ensaio potenciodinâmico determinou-se o potencial de corrosão, calculou-se a taxa de corrosão e estimou o aumento de vida útil do material recozido em relação ao encruado.

Palavras-chave: Alumínio. Recozimento. Estabilização. Têmpera. Corrosão. Potenciodinâmico.

FERREIRA, Leandro de Mello; GERALDI, Júlio César. **Analysis of the influence of annealing and stabilization on the corrosion resistance of alloy Al AA 5052.** 2018. 46 f. TCC (Undergraduate) - Technology Course in Metallurgical Processes, Faculty of Technology of Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, 2018.

Abstract

When a reduction of consumption and an environment become imprescriptible for the industry segment in the world, aluminum and alloys appear as a good option. Metal alloys are also known as non-alloyed aluminum alloys, ranging from 99.0% to 99.5% aluminum, the remainder being essentially composed of iron and silicon. It is possible to obtain a metal with high purity, above 99.5% aluminum, reaching up to 99.9% purity, a very high price which is either difficult when required or with high potency or high strength. to corrosion. Providing present metals, replacing steel and cast iron, provide great benefits by reducing component weight, increasing corrosion resistance and recycling prospect. However, aluminum alloys are more difficult to be typed in contact with less electronegative, such as gold, copper, chlorine, nickel and iron. The particles present in foods, such as pigments and metal ions, are also corrosion accelerators. The right to change the properties of alloys can be improved or deteriorated mechanical properties and protection against corrosive environments. This sense of work was to determine the determination of the resistance and annealing of the alloy of aluminum AA5052 in the corrosion resistance in middle saline. With the use of the microscopy of the samples, already with the potential of loss of mass and determination by microscopy of the samples, already with the use of the potentiated test the potential of corrosion was determined, a rate of corrosion was calculated and estimated the increase of life of the annealed material in relation to the machining.

Keywords: Aluminum. Annealing. Stabilization. Quenching. Corrosion. Potenciodynamic.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal que se sobressai aos demais devido à suas inúmeras características e propriedades, tais como: estética, baixa densidade, elevada condutibilidade elétrica e térmica, alta resistência à corrosão e a baixas temperaturas, boa tenacidade e boa conformabilidade. A capacidade de agregar elementos de liga ao alumínio proporciona a otimização de outras características, aumentando a abrangência do metal no mercado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017).

Diversas ligas de alumínio são susceptíveis à corrosão intergranular ou intercrystalina, que se manifesta no contorno dos grãos e ocorre principalmente em ligas Alumínio-Zinco-Magnésio, Alumínio-Magnésio, contendo mais que 3% de Magnésio, Alumínio-cobre e duralumínio, sendo que o mecanismo de corrosão nessas ligas é o eletroquímico e a diferença de potencial entre o precipitado no contorno do grão e a matriz nas ligas mencionadas é considerável. Especificamente o Alumínio puro apresenta alta resistência à corrosão por pites, enquanto as ligas comerciais do grupo 5xxx apresentam menor ocorrência deste tipo de corrosão, seguidas pelas ligas do grupo 3xxx (SOARES, 2013). Neste sentido, este trabalho apresenta um estudo referente à resistência a corrosão em meio salino da liga de Alumínio AA5052 em que são avaliadas amostras no estado encruado e recozido (POLASTRO; ROCHA, 2011).

1.1 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as influências que o recozimento e a estabilização causam na resistência a corrosão na liga de alumínio AA5052 em meio salino.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar perdas de massa e morfologia do material utilizando o método acelerado de câmara salina.
- Analisar os aspectos da morfologia e tipos de corrosão, a perda de massa, realizar o cálculo da taxa de corrosão do material e suas curvas de polarização.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Alumínio e suas ligas

O alumínio é um dos metais mais abundantes na superfície terrestre, possui um grupo de características que o distingue dos demais como propriedades mecânicas, físicas e químicas (MOURA; FERREIRA; ARAÚJO NETO, 2008). A Tabela 1 nos revela algumas dessas características físicas, ressaltando, ainda, sua excelente resistência à corrosão, mesmo quando exposto a ambientes agressivos.

Tabela 1. Propriedades do Alumínio AA1XXX

Densidade (Kg/m ³)	Condutividade Elétrica (%I.A.C.S)	Condutividade Térmica a 25°C (W/(m.°C))	Coefficiente de Expansão Linear (1/°C)	Calor Específico Médio 0- 100°C (J/(Kg°C))	Calor Latente de Fusão (KJ/Kg)	Ponto de Fusão (°C)	Módulo de elasticidade (MPa)
2700	62	222	$23,6 \times 10^{-6}$	940	388	660	69×10^3

Fonte: (WHITE MARTINS, 2002).

As limitações principais do alumínio são a sua resistência mecânica e sua dureza, que por serem baixas exigem a adição de elementos de liga que, por sua vez, elevam significativamente essas propriedades. Sendo assim tais afirmações justificam o emprego cada vez maior do alumínio e suas ligas no cenário mundial, inclusive naqueles onde se faz necessário materiais com alta resistência mecânica. O alumínio se divide em vários grupos, dependendo de sua composição química e processo de fabricação. O objetivo das ligas de alumínio é alterar a resistência mecânica do metal sem prejudicar outras propriedades, favorecendo a uma aplicação específica desejada. A Tabela 2 apresenta os grupos de alumínio e suas ligas trabalhadas (WHITE MARTINS, 2002).

Tabela 2. Alumínio e suas ligas

Designação de série	Indicação da composição
1XXX	Mínimo de 99% alumínio
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: (WHITE MARTINS, 2002).

Falando de maneira geral, podemos separar os elementos entre os que proporcionam à liga a sua característica primordial (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes, estampabilidade, entre outras), os que têm função adjacente, como controle de microestrutura e as impurezas que perturbam o processo de fabricação ou a aplicabilidade do produto, necessitam ser controlados dentro de uma faixa específica de tolerância. Em um grupo de ligas, um determinado elemento químico exerce a função de adição de liga e em outro ser indesejável como impureza. Um bom exemplo dessa relação é o chumbo (Pb), que é inserido às ligas de usinagem por seu efeito conhecido como “quebra cavacos”, contudo por ser um metal pesado recebe grandes restrições em produtos que tenham contato com alimentos (ZANGRANDI, 2008).

Nas ligas de alumínio o elemento mais comum é o silício, aparece no material como decorrência do processo de fabricação do alumínio a partir da bauxita. Adicionalmente o silício apresenta uma baixa solubilidade, pendendo a associar-se, principalmente, com o ferro, manganês e magnésio. Com o magnésio, produz o composto de Magnésio (Mg_2Si), encarregado do endurecimento pelo processo de tratamento térmico das ligas do grupo 6XXX. O silício é o principal elemento de liga utilizado nas ligas fabricadas pelo processo de fundição, já que eleva a capacidade do metal líquido de ocupar todos os detalhes e cavidades estreitas dos moldes (fluidez), controla todas as etapas da solidificação e o índice de porosidade nas peças vazadas e eleva a capacidade de resistir ao desgaste. O cobre é

outro elemento que propicia uma ampliação da resistência mecânica da liga, produzindo precipitados que favorecem o endurecimento, quando adicionados em teores ao redor dos 5%. Ademais, na forma de solução sólida colabora para o refino de vários outros precipitados endurecedores, como o Mg_2Si , salientando seus efeitos. O magnésio também é um forte endurecedor das ligas de Alumínio, tanto em solução sólida como combinado com outros elementos, constituindo precipitados endurecedores (Mg_2Si , $MgZn_2$). Também proporciona elevada resistência à corrosão às ligas Al-Mg e as ligas fundidas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2003).

A impureza mais comum no alumínio é o ferro, tendendo a se combinar com o silício, forma o composto da família Al-Fe-Si, cujo controle da morfologia deve ser executado nos processos de vazamentos e homogeneização para não haver uma característica prejudicial de transformação mecânica a quente do metal. Contudo, ligas com porcentual de ferro inferior de 0,1%, mostram a tendência de crescimento anormal de grãos. Quando inserido propositalmente, em companhia do níquel, produz compostos estáveis em temperatura elevada, que beneficiam a resistência do alumínio em processos a quente. Na fundição sobre pressão, o ferro é inserido em teores de 0,6% a 1,0 % em algumas ligas, com o intuito de descomplicar o destacamento do molde, qualquer teor acima desses eleva a fragilidade das peças. O manganês adicionado na faixa de 1% a 2% contribui para elevar a resistência mecânica do alumínio comercialmente, assegurando boa formabilidade a frio. A família de ligas Al-Mn é utilizada na laminação com muita frequência, sendo que o Manganês, o Zircônio e o Cromo, quando adicionados em teores de 0,1% a 0,3%, executam um papel de controladores de microestrutura do material trabalhado a quente. Esses elementos formam compostos estáveis na temperatura de conformação e de tratamento térmico, retendo o aspecto de granulação deformada do produto trabalhado (estrutura fibrosa), o que aumenta suas propriedades mecânicas na direção longitudinal. Entretanto, esses elementos têm o inconveniente de dificultar a solubilização das ligas tratáveis termicamente, aumentando sua sensibilidade a têmpera e fazendo com que sejam necessários meios de resfriamento mais enérgicos para conseguir a solubilização do material. A adição de zircônio deve ser feita com critério, pelo seu efeito de “envenenamento” sobre os refinadores de grão à base de titânio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2003).

O Zinco é um forte endurecedor presente nas ligas 7XXX, adicionados em altos teores, formando com o Magnésio precipitados endurecedores da família $MgZn_2$, o que confere as ligas desses grupos as mais altas resistências mecânicas dentre as ligas comerciais. Esse grupo de ligas apresenta, como principal restrição, a tendência de sofrer corrosão sob tensão, mais crítica, ainda, devido à sua extensa utilização em componentes aeronáuticos, o que torna necessária a adoção de processos de fabricação e procedimentos

de controle de qualidade diferenciados para os produtos fabricados com elas. O titânio é adicionado em baixas concentrações na forma do composto $TiAl_3$, que se dispersa no alumínio líquido em condições de adição controlada, atuando como núcleos de solidificação e refinando o grão do produto vazado. Sua ação é complementada pelo boro, que formando o composto TiB_2 , aumentando a eficiência do refinador de grão. O boro também atua ao remover da solução sólida titânio, manganês, cromo e vanádio, que são elementos que diminuem a condutibilidade elétrica do material. O sódio e o estrôncio são adicionados como modificadores nas ligas de fundição transformando a morfologia do silício precipitado, de plaquetas poligonais para arredondadas, melhorando a característica mecânica das peças fundidas. Quando não introduzidos como elementos de liga, as porcentagens destes elementos são consideradas impurezas, tendo que ser controladas cuidadosamente, de forma que o metal resultante possa ser considerado como uma liga (MAGAROLA, S. C.; BELTRAN, J. 1959).

2.1.1 Nomenclatura das ligas

Historicamente, as ligas de alumínio foram desenvolvidas com a finalidade de aumentar a resistência mecânica do alumínio puro, que apesar de elevada ductilidade e boa resistência à corrosão apresenta baixas propriedades mecânicas. As ligas de alumínio foram divididas em dois grupos, o grupo das ligas trabalháveis, e o das ligas não trabalháveis. Elas foram agrupadas em famílias ou series, e cada liga dentro de uma mesma serie é identificada por um sistema de quatro dígitos (ZANGRANDI, 2008). Na Tabela 3 é mostrada a divisão das ligas fundidas e seus principais elementos.

Tabela 3. Composição das ligas de Alumínio

Série	Composição Química	Principais Aplicações
1XXX	Al comercialmente puro	Contatos elétricos
2XXX	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria aeronáutica
3XXX	Al-Mn e Al-Mn-Mg	Latas de bebidas
4XXX	Al-Si	Metal de adição para soldas
5XXX	Al-Mg	Indústria Naval
6XXX	Al-Mg-Si	Perfis arquitetônicos
7XXX	Al-Zn	Indústria aeronáutica
8XXX	Al-Sn	Várias

FONTE: (ZANGRANDI, 2008).

2.1.2 LIGAS DA SÉRIE 5XXX

O magnésio é um dos elementos mais utilizado na fabricação de ligas de alumínio, sendo classificadas como as ligas da série 5XXX. Estas podem conter, além de magnésio, também o manganês, sendo esta que foi utilizada nesta pesquisa. As ligas desta série são as que demonstram ter as maiores resistências entre as ligas não-tratáveis termicamente, e por este motivo são utilizadas para aplicações estruturais (GOMES, 2017). A Tabela 4 evidencia a composição química das ligas do grupo 5xxx.

Tabela 4. Composição química das ligas do grupo 5XXX

Porcentagem em peso									
Liga	Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	Zr	Ti	Al
5052	-	2,2-2,8		-	-	0,25	-	-	Restante
5454	-	2,7	0,75	-	-	0,12	-	-	Restante
5083	-	3,5-4,5	0,7	-	-	0,15	-	-	Restante
5086	-	4	0,45	-	-	0,15	-	-	Restante
5456	-	5,1	0,75	-	-	0,12	-	-	Restante

FONTE: (GOMES, 2017)

2.2. Liga AA5052

Ligas do grupo alumínio-magnésio, nas quais o magnésio é elemento de liga predominante, são dúcteis no estado recozido, mas endurecem rapidamente sob trabalho a frio. Suas características são a ótima soldabilidade e alta resistência à corrosão em ambientes marítimos e em geral a resistência mecânica aumenta com teores crescentes de magnésio (GOMES, 2017).

As ligas de alumínio AA5052 dispõe de uma excelente usinagem e estabilidade, com uma dureza entre 40 e 50HB, variável conforme espessura, sendo muito utilizado em pequenas produções. Ligas de Al-Mg são dúcteis no estado recozido, mas endurecem rapidamente sobe trabalho a frio e, além de possuírem alta resistência à corrosão em ambientes marítimos. A liga de Alumínio AA 5052 possui o seu peso específico de 2,70g / cm³, sendo 1/3 menor que o aço, proporcionando um desgaste e esforço menor do equipamento, como também, facilitando a troca do molde, a Tabela 5 mostra a composição da liga AA 5052 (COPPERMETAL, 2018).

Tabela 5. Composição química da liga AA 5052

Composição química						
Liga	Mg	Cr	Al	LE-Mpa (%)	LR-Mpa (%)	Along (%)
5052	2,2-2,8	0,25	Restante	60	170-215	20

FONTE: (COPPERMETAL, 2018)

2.3.Tratamentos Térmicos em Ligas de Alumínio

2.3.1. Têmperas

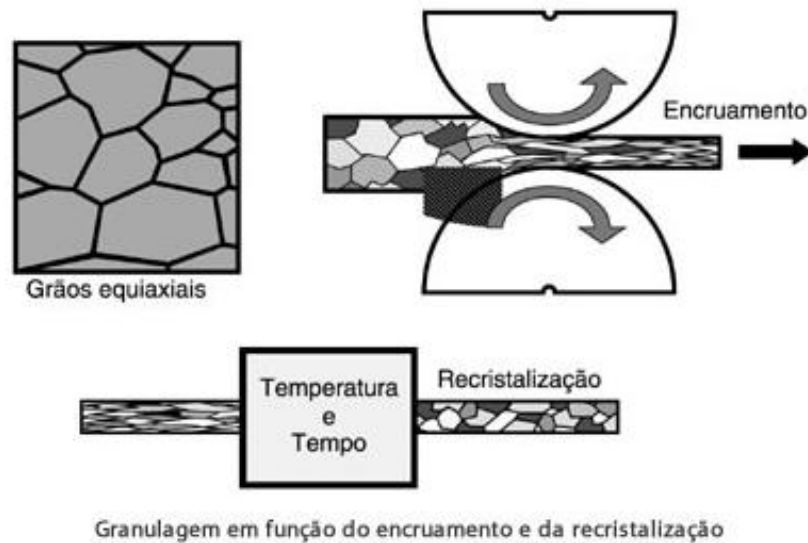
A têmpera é uma condição imposta a liga ou ao metal, através de um tratamento térmico ou uma deformação plástica a frio, proporcionando uma estrutura com características mecânicas específicas. Não há qualquer ligação entre a expressão usada nos produtos de aço (material tratado termicamente para aumentar suas propriedades mecânicas) com a utilizada no alumínio. A resistência original pode ser aumentada agregando-se certos elementos, as propriedades mecânicas das ligas, com exceção de algumas para fundição, não dependem apenas da sua composição química. Assim como em outros metais, as ligas alumínio têm seu endurecimento e o aumento de sua resistência quando trabalhadas a frio, como numa chapa laminada. Além de que, certas ligas de alumínio ostentam a valiosa característica de responder ao tratamento térmico, adquirindo resistências mais elevadas do que as que são obtidas apenas por deformação a frio (ABAL, 2018).

Sendo assim, o Alumínio e suas ligas são separados em dois grupos: as ligas “não-tratáveis” termicamente, que têm a resistência aumentada apenas através do trabalho a frio e as ligas “tratáveis” termicamente, conferindo-lhes uma característica de maior resistência mecânica. As ligas “tratáveis” termicamente permitem ser trabalhadas a frio e sofrer o tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica. As ligas “não-tratáveis” termicamente permitem ser submetidas a certos tratamentos térmicos, como de estabilização e recozimentos parciais ou plenos. A classificação das têmperas são conforme a norma NBR 6835 e de acordo com os processos a que são submetidos: “F” (como fabricada), “O” (recozida), “H” (encruada), “W” (solubilizada) e “T” (tratada termicamente) (INFOMET, 2018).

2.3.1.1. Têmpera “O” (recozimento)

O recozimento pleno é um tratamento térmico em que se obtém as condições de plasticidade máxima do metal, correspondendo a uma recristalização total do mesmo. O metal é aquecido, geralmente na faixa de 350°C, suficientemente para permitir o seu rearranjo numa nova configuração cristalina não deformada (ABAL, 2018).

Figura 1. Processo de recristalização dos grãos



FONTE: (ABAL, 2018).

Este processo de recristalização remove o efeito do trabalho a frio e deixa o metal numa condição dúctil. O recozimento bem-sucedido caracteriza-se somente pela recristalização primária. Deve - se evitar superaquecimentos que causam coalescência e o crescimento exagerado dos grãos, também chamada de recristalização secundária, com a conseqüente tendência de ser desenvolvido o defeito “casca de laranja” nos trabalhos subsequentes, principalmente de estampagem (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017).

2.3.1.2. Têmpera “H” (Encruamento)

A têmpera “H” corresponde às ligas que sofreram tratamentos mecânicos (deformação plástica) para encruamento HXX. Os números 1, 2, 3 e 4 quando são colocados logo após a letra “H” referem-se às operações sofridas:

- H1: Somente laminado, aplicado os materiais que sofreram deformação plástica a frio para obtenção de resistência mecânica desejada (ALEXANDRE SARTORI, 2010).
- H2: Laminado e recozido parcial, este tipo de tratamento térmico corresponde a uma recristalização parcial do material, permitindo a obtenção de têmperas com alongamentos maiores. Esse processo favorece, em alguns casos, o processo de estampagem, conferindo ao produto-final uma maior

resistência mecânica. Pode ser realizado entre as temperaturas de 200°C a 280°C, dependendo da porcentagem de redução aplicada na laminação a frio (ALEXANDRE SARTORI, 2010).

- H3: Laminado e estabilizado, EX: Nas ligas Al-Mg (série 5XXX), após alguns dias em temperatura ambiente, ocorre uma perda de propriedades mecânicas do material deformado a frio. Para contornar esse inconveniente, aquece-se o material em temperaturas ao redor de 150°C para acelerar a recuperação (têmperas H3X). Este tratamento alivia a tensão residual dos materiais encruados. (ABAL, 2018).
- H4: Laminado e pintado ou envernizado: Materiais deformados plasticamente a frio e que sofrem tratamentos térmicos e subsequentes uma operação de pintura ou envernizamento. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017).

Já os números 2, 4, 6, 8 e 9 quando são inseridos por último referem-se o grau de encruamento, ou seja, a porcentagem de redução (ABAL, 2018).:

- HX2: 20% de redução.
- HX4: 35% de redução
- HX6: 60% de redução
- HX8: 75% de redução
- HX9: 85% de redução

2.2 Corrosão

A corrosão consiste na oxidação do material pela ação química ou eletroquímica do meio. Ela pode se incidir em diversos tipos de materiais, sejam metálicos ou não, onde no processo os metais reagem com os não metálicos presentes no meio, particularmente o oxigênio e o enxofre, produzindo assim os compostos que são encontrados na natureza. A corrosão pode ser separada em dois grupos, eletroquímica e química dependendo do tipo de material e do meio corrosivo ao qual este está exposto (NUNEZ, 2007). A Tabela 6 mostra as características dos processos corrosivos.

Tabela 6. Características da corrosão química e eletroquímica

Natureza do Processo Corrosivo	Características
Corrosão eletroquímica (corrosão aquosa)	Presença de água líquida
	Temperatura abaixo do ponto de orvalho
	Formação de pilhas ou células eletroquímicas
Corrosão química (corrosão seca)	Ausência de líquido
	Temperatura acima do ponto de orvalho
	Interação direta entre o metal e o meio

FONTE: (NUNEZ, L.P., 2007)

Para que ocorra a corrosão, o material e o meio devem apresentar todas as características fundamentais, tanto para a corrosão química e eletroquímica. (NUNEZ, 2007). A Tabela 7 mostra os tipos de corrosão.

Tabela 7. Tipos de corrosão

Tipo de corrosão	Caracterização morfológica	Locais de ocorrência	Fatores influentes	Observações
Corrosão sob tensão	Desgaste localizado, através dos contornos para os materiais frágeis.	Em materiais submetidos à tensão estática de tração e sujeito a corrosão sob tensão em determinados meios.	Natureza do material e do meio corrosivo. Tensões de trabalho e temperatura.	Ocorre sempre por pares típicos, material - meio corrosivo.
Corrosão intergranular	Desgaste localizado, através dos contornos de grão	Em ligas de Al-Mg, Al-Zn e Al-Cu.	Temperatura de trabalho, tratamento térmico e composição da liga.	Pode ser evitado com o tratamento térmico de homogeneização.
Corrosão por esfoliação	Desgaste uniforme e acelerado em toda a superfície.	Fluídos líquidos contendo cloreto.	Velocidade do fluido.	Elevadas taxas de desgaste pela remoção contínua do material na superfície.

FONTE: (NUNEZ, L.P., 2007)

2.2.1 Corrosão em ligas de Alumínio

Basicamente o mecanismo de corrosão do alumínio trata-se da formação de uma película superficial de óxidos formada, resultante da combinação do alumínio com o oxigênio atmosférico (Al_2O_3), que é instável em pH inferior a 4,5. A solubilização dessa película expõe a superfície do material a processos corrosivos que podem ser provocados pela presença de catalisadores como íons (Cl^- , Cu^{++} , Fe^{++}), oxigênio do meio, além de resíduos de sanitizantes (JELLESEN, RASMUSSEN, HILBERT, 2006).

A corrosão do alumínio pode ocorrer de forma localizada ou uniforme (DAVIS, 1999), sendo a corrosão por esfoliação o processo mais severo. Outras formas de corrosão, como intergranular, que se desenvolve no contorno dos grãos do metal, e filiforme, que se desenvolve unifilarmente sobre filmes de revestimento, também são observadas em ligas de alumínio, porém muito menos frequentes em embalagens de alumínio destinadas ao acondicionamento de alimentos. Os trabalhos encontrados na literatura sobre corrosão filiforme e intergranular são estudos de materiais (ligas) utilizados para aplicações outras que não alimentos e bebidas, embora este tipo de corrosão também seja observado em embalagens destinadas para o setor alimentício.

2.2.2 Corrosão por pite

A corrosão por pites é o tipo de corrosão localizada mais comum em alumínio. A formação de pites é uma forma de corrosão localizada que continua produzindo cavidades a partir da superfície e é um caso extremo onde áreas muito pequenas da superfície metálica são atacadas, enquanto a parte principal da superfície permanece intacta. Em geral ocorre em metais que são cobertos por uma fina camada de óxidos, como o alumínio, sendo as regiões de ataque determinadas pelas características microscópicas do material e podendo ocorrer em sistemas metal-meio aparentemente livre de heterogeneidades. A corrosão por pites resulta, geralmente, de atuação de “ilha” ativa – passiva nos locais de pequena área (pontos) onde há o rompimento de tal camada passiva. É um tipo de corrosão que não implica em redução homogênea da espessura, inicia-se na superfície do metal seguindo em direção a sua espessura e desenvolvendo-se no interior do material, torna-se difícil acompanhar a sua evolução. (RAMANATHAN, 1992).

A corrosão por pites é um tipo de corrosão que ocorre nos materiais passiváveis, sendo que a ação dos halogenetos (Cl , Br , I , F) causa o rompimento da camada de passivação e a dissolução causada localmente nesta camada produz uma área ativa, que diante da área restante passivada circundante consideravelmente maior, produz uma corrosão muito intensa e localizada. O potencial em que ocorre a quebra de passividade é

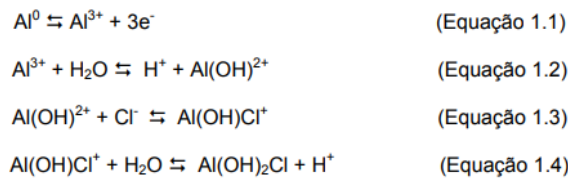
uma variável muito importante nesse processo, sendo considerado de fato que o que ocorre seja a alteração do comportamento da polarização anódica dos sistemas de materiais, tanto o metálico quanto seu produto passivo, pela ação dos íons halogenetos. Considera-se como fator importante para o mecanismo de formação de pites a existência de pontos de maior fragilidade da camada de passivação (defeitos em sua formação), fazendo com que o pH no interior dos pites se altere substancialmente para o espectro ácido dificultando a restituição da camada de passivação inicial. Como consequência disto, a pequena área anódica formada diante de uma grande área catódica provoca a corrosão localizada e intensa. Na prática, a maioria das falhas em materiais metálicos na forma de pites é causada por íons cloreto. Os cloretos estão presentes principalmente na água e em soluções aquosas. Existem diversos mecanismos possíveis pelos quais os íons cloreto podem penetrar e participar do ataque ao material. Essas possibilidades envolvem o transporte de íons através do filme de óxido e a dissolução localizada do filme. Em geral, é aceito que o primeiro passo no processo de iniciação da corrosão por pites envolve a adsorção de íons cloreto na superfície da camada de óxido. (SOARES, 2013).

A maioria dos fenômenos de corrosão ocorre de forma aleatória e caótica pela superfície exposta. Como consequência a corrente medida em uma amostra de área grande durante a corrosão com presença de diversos pites, não é representativa do comportamento dos pites individuais. O monitoramento direto do comportamento eletroquímico local dos pites é difícil devido ao pequeno tamanho dessas corrosões e incerteza de tempo e seu local de nucleação. De acordo com a descrição de SOARES (2013), quatro estágios de corrosão por pites podem ser distinguidos: (1) processos ocorrendo no filme passivo, no entorno do filme passivo e na solução; (2) processos ocorrendo dentro do filme passivo, quando não há mudança microscópica visível no filme; (3) formação de pites metaestáveis, os quais iniciam e crescem por um curto período abaixo do potencial crítico de pites e então repassivam; e (4) desenvolvimento de pites estáveis, acima do potencial definido como potencial crítico de pites. A corrosão em liga de alumínio AA1050 exposta a diversas condições ambientais e encontraram espécies de cloreto e sulfatos como constituintes principais das camadas de corrosão. Esses autores observaram que a corrosão se desenvolveu como falha na vizinhança dos grãos e como consequência se manifestou através de pites. O comportamento da corrosão por pites em alumínio puro (99,999%), introduzindo um método para criar pites de corrosão únicos no alumínio em meio clorado, indicando que o principal produto de corrosão do Alumínio em um pite é $\text{Al}(\text{OH})_3$, embora esse composto não seja estável em baixo pH, como o verificado no momento da formação dos pites. A acidez verificada nesse estudo foi associada à hidrólise do Al^{+3} , que resulta em $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$. A importância de se estudar a influência de íons cloretos nos processos de

corrosão que se desenvolvem no alumínio e em suas ligas se destaca pelo número de trabalhos desenvolvidos nos últimos anos com esse assunto. (RAMANATHAN, Sd).

A Figura 5 mostra a sequência de reação é relatada por alguns autores (SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 1999; WONG e ALKIRE, 1990) como a que ocorre na superfície do alumínio em meio aquoso clorado. Primeiramente há uma ionização da superfície do alumínio (Equação 1.1) precedendo uma rápida hidrólise (Equação 1.2). Então o hidróxido de alumínio reage com íons cloreto (Equação 1.3) e depois com água (Equação 1.4) resultando na acidificação do meio.

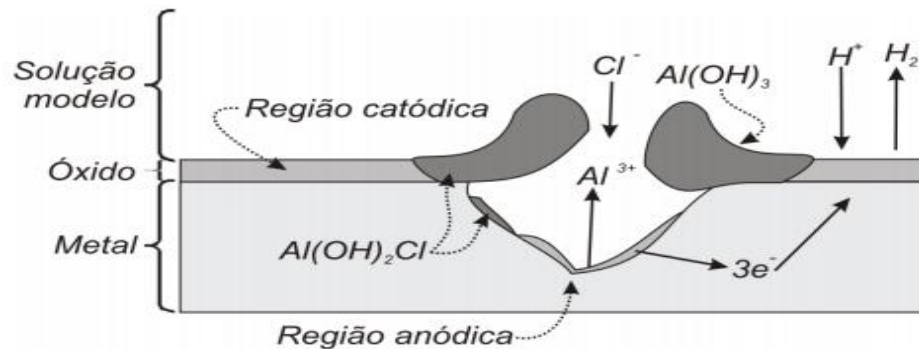
Figura 2. Equações das reações



Fonte: (SOARES, 2013)

Íons de elementos oxidantes, como cloreto, cobre e ferro, são extremamente agressivos. Mesmo as ligas mais resistentes podem sofrer corrosão por pites através de compostos como CuCl_2 e FeCl_3 . Os cloretos de cobre e de ferro não necessitam da presença de oxigênio para promover o ataque à superfície da folha, pois seus cátions podem ser catodicamente reduzidos (FONTANA, 1986).

Figura 3. Esquema ilustrativo de corrosão por pite



Fonte: (SOARES, 2013)

2.2.3 Corrosão por Esfoliação

Esse tipo de corrosão ocorre devido ao aumento do movimento relativo entre a superfície do metal e um fluido corrosivo, onde as partículas sólidas do metal são arrastadas devido á ação abrasiva dos fluidos, e o ataque é localizado onde essa película foi removida (RAMANATHAN.s/d).

Corrosão por esfoliação é um ataque sub superficial, que ocorre ao longo dos contornos de grão paralelo à superfície do material. Esse tipo de corrosão ocorre predominantemente em produtos deformados com estrutura de grãos alongados, conforme Sartori e Silva (2007).

2.2.4 Corrosão Intergranular

Segundo Sartori e Silva (2007), a corrosão intergranular acontece nos contornos de grãos resultados de um desprendimento do mesmo. Quando aquecidas, durante um determinado tempo, algumas ligas tornam se susceptíveis a este tipo de ataque. Esta corrosão tem mecanismo eletroquímico, onde alguns elementos da liga no momento da difusão se deslocam até o contorno de grão, a fim de formar precipitado o que resulta no empobrecimento da estrutura. Ligas de alumínio magnésio com mais de 3% de magnésio em sua composição, quando expostos a determinadas temperaturas durante determinado período apresentam um precipitado de Mg_2Al_3 nos contornos de grão. Estes precipitados são menos nobres que a matriz do grão, gerando assim a propagação da corrosão intergranular. (NUNEZ, 2007).

2.2.5 Corrosão sob tensão

A corrosão sob tensão é o resultado da aplicação de uma determinada tensão em um material exposto a um ambiente corrosivo, sendo necessários esses dois fatores para que ela ocorra. Sua ocorrência se dá nos contornos de grão devido a precipitação de segundas fases, podendo causar o aparecimento de trincas transgranulares ou intergranulares. Esse tipo de corrosão é o resultado combinado de uma tensão que está sendo aplicada em um ambiente corrosivo, e para esse tipo de ocorrer são esses dois fatores são necessários. (CALLISTER,2006).

Neste tipo de corrosão formam-se trincas no material, que podem ser transgranulares ou intergranulares. Esse tipo de corrosão ocorre geralmente no contorno de grão, devido à precipitação de segundas fases nos contornos de grão. (NUNEZ, 2007).

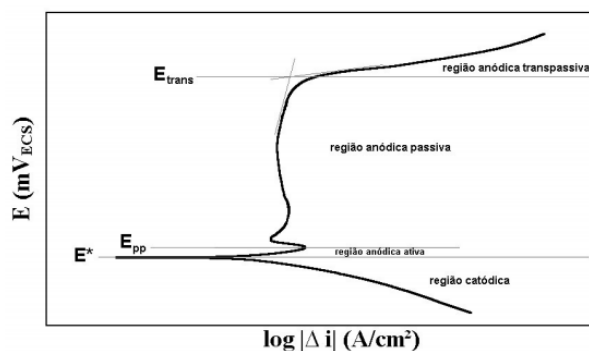
2.3. Acompanhamento da corrosão

O monitoramento da corrosão consiste na utilização de técnicas que permitam avaliar os processos de corrosão, que possam afetar a integridade do material. A monitoração também pode ser realizada através de ações preventivas para prever medidas corretivas que asseguram uma vida longa para equipamentos e instalações. Para ocorrer um eficiente controle de corrosão, deve-se seguir um ciclo fechado entre os parâmetros de processo, o sistema de monitoramento e as ações corretivas do processo corrosivo (JAMBO; FÓFANO, 2003).

2.3.1 Método Potenciodinâmico

A polarização potenciodinâmica é a técnica para a obtenção de curvas de polarização, e prevê a varredura contínua do potencial, iniciando-se ou no potencial de corrosão (aquele que se estabelece quando da imersão do material na solução, também chamado de potencial de circuito aberto) ou em potenciais onde predominam reações catódicas (aqueles menores que o potencial de corrosão), elevando-se o potencial a taxa de varredura constante. A velocidade de varredura, a composição da solução, o tempo de imersão anterior a varredura de potencial e a temperatura de ensaio podem influenciar a forma das curvas de polarização. A corrente, nas curvas de polarização (FRANZOTT, 2010).

Figura 4. Curvas do modelo polarização.



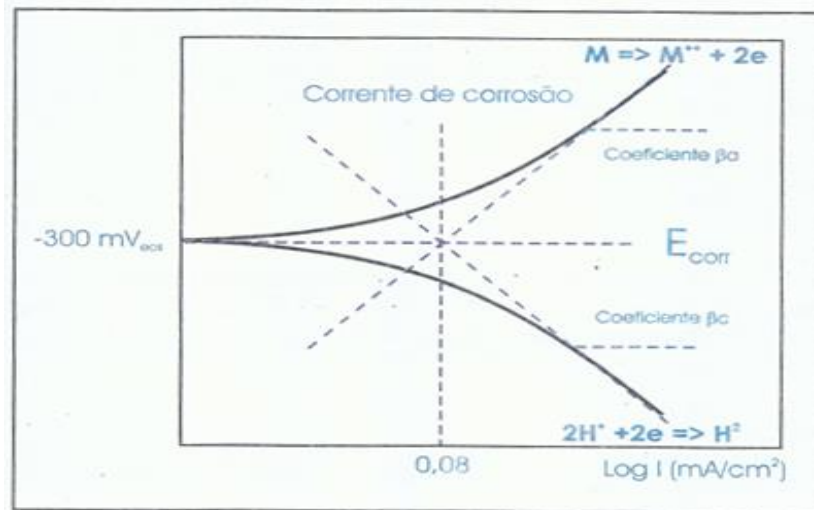
Fonte: (FRANZOTT, 2010)

Todo o trecho anódico da curva de polarização representa a faixa de potencial na qual pode ocorrer a dissolução anódica (corrosão) do metal ou reações de interface metal / solução, podendo haver redução ou oxidação de compostos da solução utilizada. Na região anódica ativa a densidade de corrente cresce com o aumento de potencial, caracterizando a dissolução anódica (corrosão) do metal. Em alguns materiais, como os aços inoxidáveis, atingindo-se um valor máximo de corrente há, devido a formação de películas aderentes ou a estabilização de um determinado equilíbrio (metal/íon, metal/óxido ou metal/hidróxido) redução da densidade de corrente: tem início então a região anódica passiva, caracterizada nos aços inoxidáveis por baixa densidade de corrente, e, portanto, baixa, ou praticamente nenhuma, taxa de corrosão. A ocorrência da região passiva nos aços inoxidáveis, iniciada no potencial indicado na Figura 4 por E_{pp} , se deve a formação de película passiva, caracterizada por excelente aderência à superfície, ausência de condutividade elétrica, pequena espessura e alta capacidade de auto-regeneração. O método potencioestático é amplamente utilizado no monitoramento da corrosão, onde através deste método são obtidas as curvas anódicas e catódicas do material. Onde De Donder mostrou a relação $(E - E_0) j > 0$ para as reações eletroquímicas, onde o valor da sobretensão é E , o potencial de repouso é E_0 e a densidade de corrente é J . Desta forma irá se obter $E > E_0$, onde $j >$ haverá oxidação. Quando houver $E < E_0$, onde $j < 0$, haverá redução (JAMBO; FÓFANO, 2003).

Como mostrado na Figura 5, para obtermos a corrente de corrosão;

- Se traça uma reta tangente ao trecho da curva anódica, e se estende até passar por E_0 (E_{corr})
- Se traça uma reta tangente ao trecho da curva catódica, e se estende até passar por E_0 (E_{corr})
- Da intersecção entre E_0 e as tangentes catódicas e anódicas, se obtém o valor da densidade de corrosão j_{corr} , calcula-se a taxa de corrosão conforme a lei de Faraday.

Figura 5. Curva do modelo potencioestático



FONTE: (JAMBO; FÓFANO, 2003)

2.3.2. ENSAIO ACELERADO EM CÂMARA SALINA

Esse ensaio de corrosão acelerada tem como propósito duplicar em laboratório o desempenho perante corrosão em campo de um produto, proporcionando aos cientistas e engenheiros formas rápidas de se desenvolver novos produtos. Durante anos, esse ensaio teve ampla utilização por pesquisadores para se avaliar novos revestimentos metálicos, pinturas inovadoras de revestimentos (RODRIGUES, 2017).

O ensaio é realizado com uma solução aquosa, num volume de água destilada ou desmineralizada com, aproximadamente, 5% de NaCl, para a obtenção de 1 L de solução, à temperatura ambiente. Os corpos de prova planos devem ser dispostos somente na zona da câmara de ensaio na angulação de 15° a 30° com a vertical e o posicionamento deve ser, preferencialmente, paralelo ao fluxo horizontal da névoa salina. Para a obtenção dos resultados, os corpos de prova devem ser secados para, imediatamente, ser efetuada uma cuidadosa avaliação quanto à extensão da corrosão e de outras falhas, conforme estabelecido pelas especificações apropriadas (RIBEIRO, 2012).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. AMOSTRAS DA LIGA AA 5052

As amostras da liga de alumínio AA5052 encruada e recozida foram fornecidas em forma de doação pela empresa ELFER- Alumínio. A composição química das amostras da liga recebidas é apresentada pela Tabela 8.

Tabela 8. Composição química da liga AA5052

Especificado	Mínimo (%)	Máximo (%)	Encontrado (%)
Si	-	0,25	0,0864
Fe	-	0,4	0,2755
Cu	-	0,1	0,0482
Mn	-	0,1	0,05
Mg	2,2	2,8	2,4268
Cr	0,15	0,35	0,1834
Ti	-	0,1	0,0105
Zn	-	-	0,0105
Outros	-	0,15	0,2
Alumínio	Restante		

Fonte: ELFER- Alumínio

3.2. MÉTODOS

3.2.1. ENSAIO EM CÂMARA SALINA

3.2.1.1. PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras da liga de alumínio AA5052 estabilizada e recozida foram cortadas em uma fresa CNC e em uma tesoura hidráulica em formato em quadrado e cilíndrico. Sendo 3 amostras em formato quadrado da liga estabilizada e 3 amostras da Liga recozida em formato cilíndrico. As dimensões das amostras com as respectivas massas iniciais são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9. Área e massa das amostras iniciais

Amostras	Área (mm²)	Massa inicial (g)
AA5052 H32 (1)	281,86	0,959
AA5052 H32 (2)	284,46	1,0078
AA5052 H32 (3)	276,64	1,0002
AA5052 O (1)	597,15	2,8569
AA5052 O (2)	596,89	2,7666
AA5052 O (3)	597,10	2,8256

Fonte: Autor

3.2.1.2. ENSAIO E TEMPO DE DURAÇÃO

As amostras após medidas as dimensões e massas foram deixadas por um período de 120 horas em exposição ao ambiente salino. Após o período de 120 horas, foi feito a pesagem das amostras novamente afim analisar a perda de massa.

3.2.2. ENSAIO POTENCIODINÂMICO

3.2.2.1 PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras foram cortadas em forma redonda numa fresa CNC, num diâmetro de 14,9 mm, posteriormente foi feito o lixamento e polimento antes de ser colocado no equipamento para início do ensaio. Como mostrado na Figura 6.

Figura 6. Corpo de prova para realização do ensaio potenciodinâmico AA5052



Fonte: Autor

Os corpos de prova foram confeccionados utilizando uma fresa CNC, sendo necessário o ajuste da peça desbastando o diâmetro final em uma lixadeira rotativa de bancada como mostrado na Figura 7.

Figura 7. Lixa rotativa de bancada



Fonte: Autor

3.2.2.2. ENSAIO

Para a realização do ensaio potenciodinâmico, as amostras foram lixadas com lixa de granulometria de 180 a 2000 e polidas com pasta de diamante de 3 μm . A análise eletroquímica foi realizada através de dois métodos, potencial de circuito aberto e curvas de polarização. Os ensaios foram realizados no equipamento da marca AUTOLAB, modelo PGSTAT 302N (Figura 8). A amostra foi inserida na célula eletrolítica contendo três eletrodos, sendo o eletrodo de trabalho consistiu de amostras de cobre e seus diferentes revestimentos, com a área exposta de 0,8 cm^2 , o eletrodo de referência (Ag/AgCl) e dois contra eletrodos de Platina.

Figura 8. Equipamento potenciostato da marca AUTOLAB



Fonte: Autor

Para a realização dos ensaios, foi utilizado uma solução aerada de alta condutividade de NaCl 3,5% (p/p) com (pH 6,2), em temperatura ambiente. Todas as amostras permaneceram imersas em solução por aproximadamente 22 horas para a estabilização do potencial e após este período, realizou-se a medida de potencial de circuito aberto no período de 2 horas.

3.2.2.3. CÁLCULO DA TAXA DE CORROSÃO

A taxa de corrosão se dá através da equação 1 (WOLYNEC,2013):

$$TC = \frac{K \times icorr \times EW}{D} \quad (\text{equação 1})$$

Onde são representados:

- TC: Taxa de Corrosão em mm/ano
- icorr: Densidade de corrente em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
- EW: Massa equivalente = massa atômica do elemento primário da liga/número de elétrons envolvidos no processo de oxidação.
- D: Densidade do material em g/cm^3

3.3. CARACTERIZAÇÃO METALGRÁFICA

Posterior aos ensaios em meio salino, as amostras foram encaminhadas ao laboratório metalográfico para uma etapa de caracterização do material, onde foi feito o embutimento das peças, seu lixamento, polimento e inspeção microscópica e macroscópica. As análises foram executadas por microscopia óptica através do estereoscópio da marca Olympus SZ2-ET (Figura 9) com aumento de 6,7x a 45x e do microscópio óptico da marca ZEISS modelo Vert.A1 (Figura 10).

Figura 9. Estereoscópio Olympus SZ2-ET.



Fonte: Autor

Figura 10. Microscópio ZEISS



Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos durante a execução deste trabalho serão apresentados e discutidos neste capítulo, onde se pretende mensurar o desempenho da camada passiva dos materiais AA 5052 O e AA 5052 H32 em ambiente salino e a obtenção da curva de polarização dos mesmos, a fim de determinar a influência dos tratamentos térmicos realizados no processo da liga na presença de situações corrosivas.

4.1. ENSAIO DE EXPOSIÇÃO EM CÂMARA SALINA

4.1.1. ANÁLISE DE PERDA DE MASSA

No ensaio de névoa salina, as amostras em duplicata ficaram expostas durante um período de 120 horas seguidas. Após o término do ensaio foi realizada a análise de perda de massa das amostras durante o período em que as peças ficaram expostas. A Tabela 10 mostra os resultados de perda de massa dos metais expostos em câmara salina após 120 horas.

Tabela 10. Análise da perda de massa e taxa de corrosão

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)
AA5052 H32 (2)	1,0078	1,0075	0,03
AA5052 H32 (3)	1,0002	0,9998	0,04
AA5052 O (2)	2,7666	2,7667	0,003
AA5052 O (3)	2,8256	2,8257	0,003

Fonte: Autor

Diante dos dados apresentados demonstrou-se que em todas as tâmporas, a perda de massa mostrou-se invariável, AA5052 H32 perda de 2,3 mg na média e AA5052 “O” perda de 2,0 mg na média, em uma das amostras não houve perda de massa. Apesar de não apresentar perdas significativas no período exposto pode-se observar maior tendência à corrosão do material encruado, havendo uma diminuição de perda de massa para o material recozido quando comparado com o estado encruado.

4.1.2. MICROSCOPIA DAS AMOSTRAS

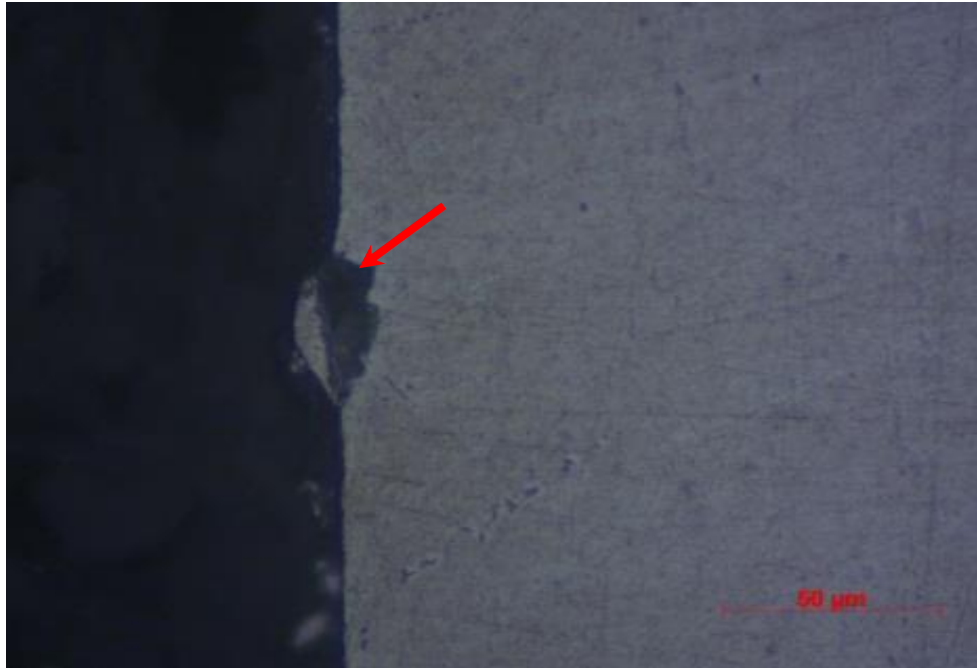
Foi executada a obtenção das imagens de micrografia das amostras, sendo duas encruadas e duas recozidas. As amostras envolvem antes e após o ensaio de câmara salina e uma do ensaio de câmara salina, conforme as Figuras 19 a 22. Na análise através de microscopia óptica foi observado a quase inexistência de pontos de corrosão, exceto raros pontos de formação de corrosão por pite. A camada passiva natural de óxido de alumínio, conforme esperado, resistiu ao ambiente corrosivo salino protegendo, assim, o metal da corrosão. Atentando ao fato de a liga estudada, AA5052, é utilizada na indústria naval, só reforça a utilização da liga.

Figura 11. Liga AA5052 H32 inicial-500x



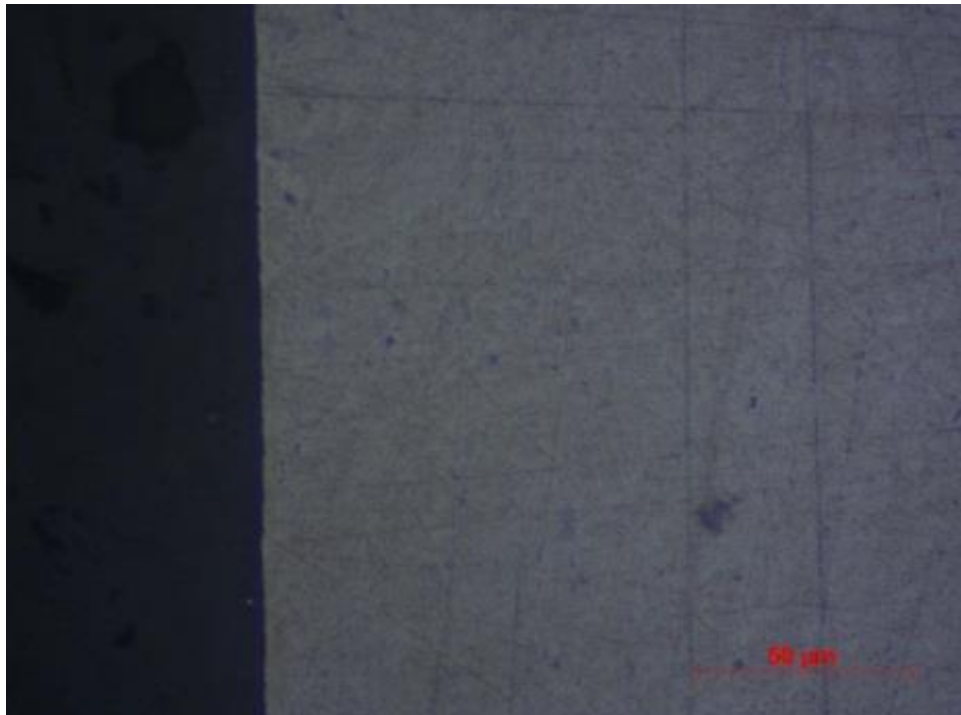
Fonte: Autor

Figura 12. Liga AA5052 H32 após o ensaio em câmara salina – 500x



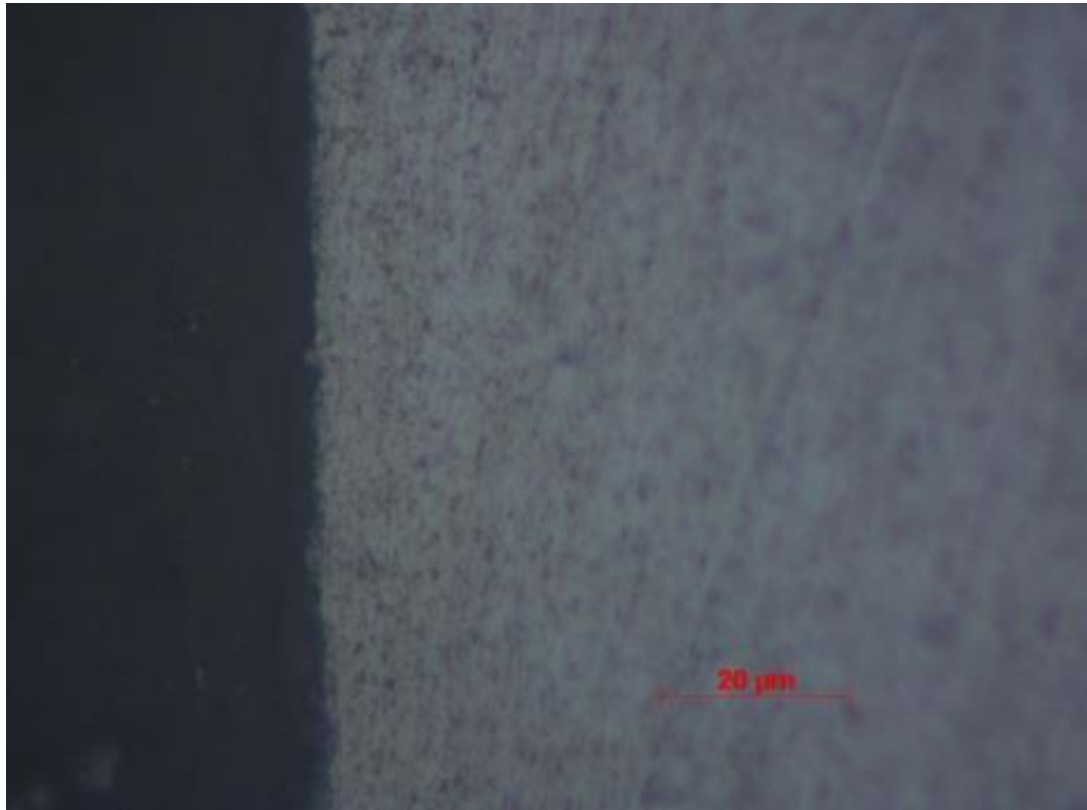
Fonte: Autor

Figura 13. Liga AA5052 O inicial - 500x



Fonte: Autor

Figura 14. Liga AA5052 O após o ensaio por imersão – 500x



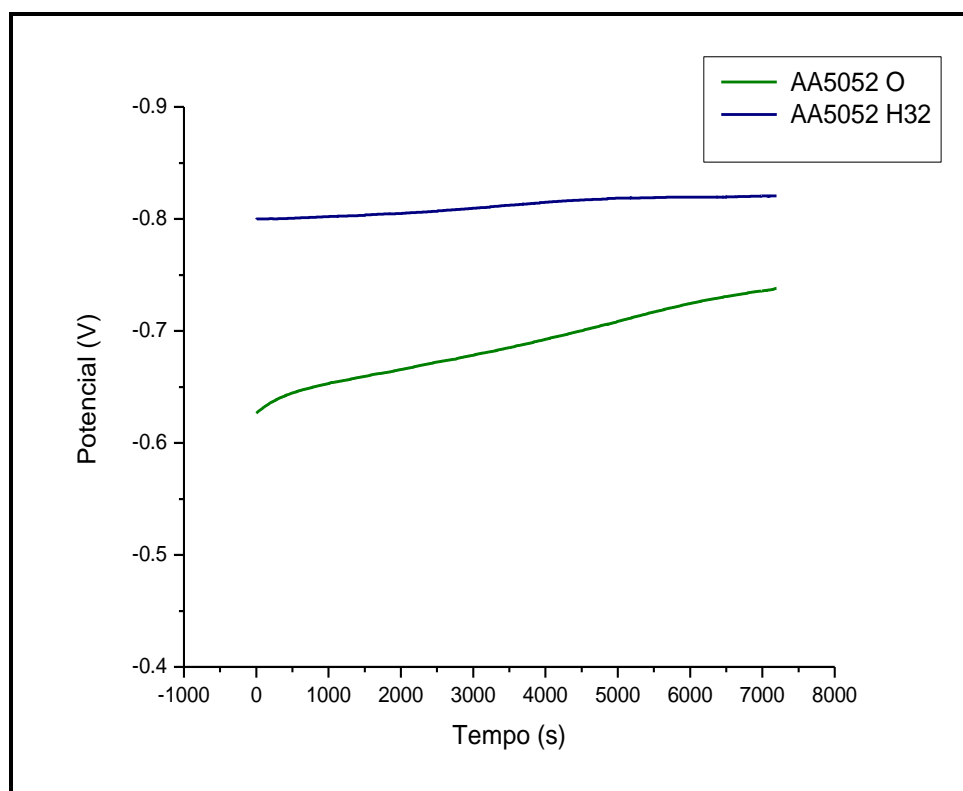
Fonte: Autor

Podemos observar pequenos pontos de corrosão por pite no material, contudo a quantidade é mínima principalmente pela Figura 12. O material comportou-se de maneira esperada, a camada natural de óxido que o alumínio possui preservou o material. As Figuras 13 e 14 apresentadas mostram as amostras no estado recozido, elas pouco apresentaram pontos de corrosão em comparação as estabilizadas, isso provavelmente é explicado pela ausência de discordâncias internas que o material recozido possui. Essa energia interna, presente em materiais estabilizados, favorece a corrosão, como foi possível observar nas amostras encruadas.

4.2. POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO E CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

Ao serem comparadas as curvas de polarização, ambas apresentaram diferentes resultados tanto em densidade de corrente como em potencial. Em relação às curvas de potencial de corrosão, foi possível notar um valor superior para a liga no estado encruado, em comparação a liga em estado recozido. Isso comprova que o alumínio em estado encruado possui uma nobreza, mesmo que pouca, mas superior ao estado recozido. A Figura 11 mostra essas curvas e seus valores.

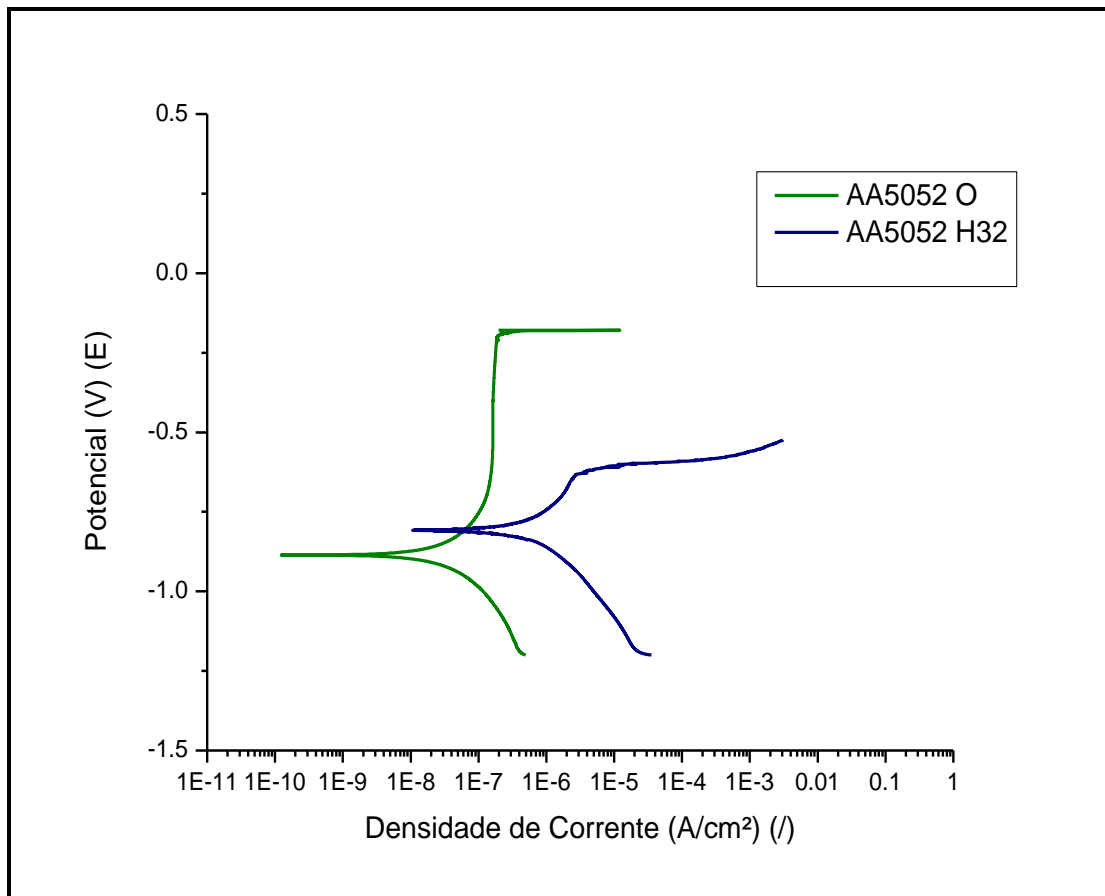
Figura 15. Curva de potencial de corrosão referentes às amostras da liga de alumínio AA5052 encruada (H) e recozida (O).



Fonte: Autor

As curvas de polarização das amostras apresentadas pela Figura 12 mostram que apesar do material no estado recozido possuir um potencial de corrosão menor, a sua capacidade de resistir á agressão imposta pela corrosão é muito superior em comparação ao material no estado encruado.

Figura 16. Curvas de Polarização referentes às amostras da liga de alumínio AA5052 encruada (H) e recozida (O).



Fonte: Autor

A liga AA5052 “O” apresentou um melhor resultado em relação à resistência a corrosão, neste caso, a densidade de corrente de corrosão foi menor em comparação à liga AA5052 H32 ($4,2668 \times 10^{-9}$ e $9,4707 \times 10^{-8}$ A/cm²) respectivamente), sua camada passiva necessitou de um potencial de transpassivação (V) maior para se romper (-0,8879 V e -0,8107 V respectivamente). Esse ensaio corrosivo é realizado em potenciais que ocorre na região anódica do gráfico, o metal sofre variações de densidade de corrente para pequenas variações de potencial, atingindo certo valor o material adquire um estado de equilíbrio, mesmo aumentando o valor do potencial não há variação na densidade de corrente, região denominada como passiva, camada essa quebrada quando atingido o ponto de transpassivação, onde o processo de corrosão se torna significativamente agressivo. Esse fenômeno se dá pelo fato de que o material em estado encruado, apesar de ligeiramente mais “nobre”, possui uma concentração de energia interna, favorecendo em muito a corrosão. Já o material no estado recozido, por não possuir qualquer resquício de

discordâncias e tensões internas, consegue através de sua camada passiva resistir muito mais ao ambiente corrosivo.

Os resultados apontam para o fato de a liga AA 5052 H32 estar no estado encruado, possuir um nível de energia interna maior em comparação ao estado recozido (AA5052 O), sendo que esta tensão interna, favorece a corrosão e os resultados desse projeto atestam a veracidade do fato. Adicionalmente, os resultados expressam o que o gráfico da Figura 12 já mostra, que a liga AA5052 H32, apesar de ter um potencial de corrosão superior e possuir uma resistência ao ambiente corrosivo, conseqüentemente sofre uma perda de massa mais acentuada em relação ao mesmo material no estado recozido após o se atingir o potencial de corrosão. A amostra da liga AA5052 O, por sua vez, resistiu bem a agressão imposta pela corrosão, ostentando sua camada passiva.

4.2.1. TAXA DE CORROSÃO

Com os resultados obtidos através do ensaio potenciodinâmico, onde foi possível descobrir os potenciais de corrosão, bem como as densidades de corrente de cada material, foram iniciados os cálculos para se conhecer a taxa de corrosão das amostras, encruada e recozida, com base nos resultados que foram adquiridos no experimento anterior.

Para o material encruado foram feitos os seguintes cálculos:

$$TC = \frac{3,27 \times 10^{-6} \times 0,094707 \times 9}{2,7}$$

$$TC = 0,0010323063 \text{ mm/ano}$$

$$TC = 10,323063 \times 10^{-4} \text{ mm/ano}$$

Já para o material recozido os cálculos foram os seguintes:

$$TC = \frac{3,27 \times 10^{-6} \times 0,0042668 \times 9}{2,7}$$

$$TC = 0,0000465081 \text{ mm/ano}$$

$$TC = 0,465081 \times 10^{-4} \text{ mm/ano}$$

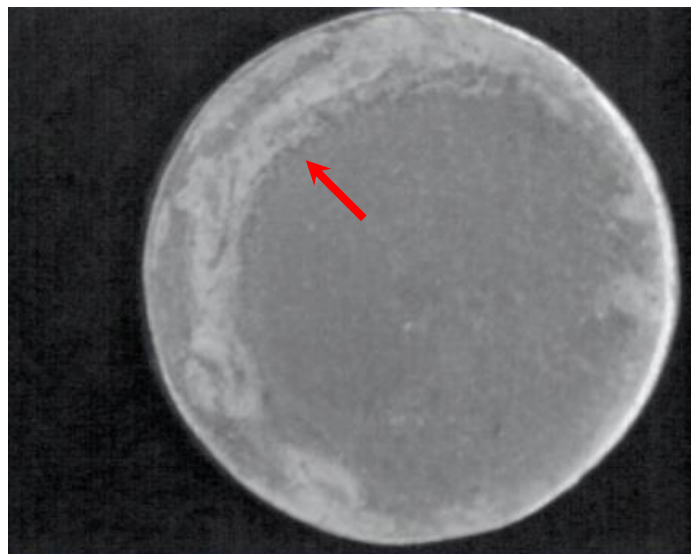
Analisando-se os resultados de taxas de corrosão, o valor referente a liga encruada é compatível ao encontrado para ligas de alumínio estudadas em ambiente salino, sendo da ordem de 0,001mm/ano (RAMATHAN, Sd). Já as amostras encruadas, sendo o maior objeto deste estudo apresentaram as taxas de corrosão cerca de 22 vezes menor sendo que estas podem representar o aumento também da vida útil do material na mesma proporção. Com estes resultados também foi confirmada a tendência observada nos ensaio em câmara salina que apontaram para menor propensão á corrosão quando á liga passa pelo tratamento de recozimento.

4.3. MACROSCOPIA DAS AMOSTRAS

Na análise macroscópica das amostras de ambas as condições, tanto estabilizado como recozido, foi verificado que houve o desenvolvimento de uma camada de óxido na superfície (mancha d'água) durante a exposição em ambiente salino, apresentando também alguns inícios de pites de corrosão.

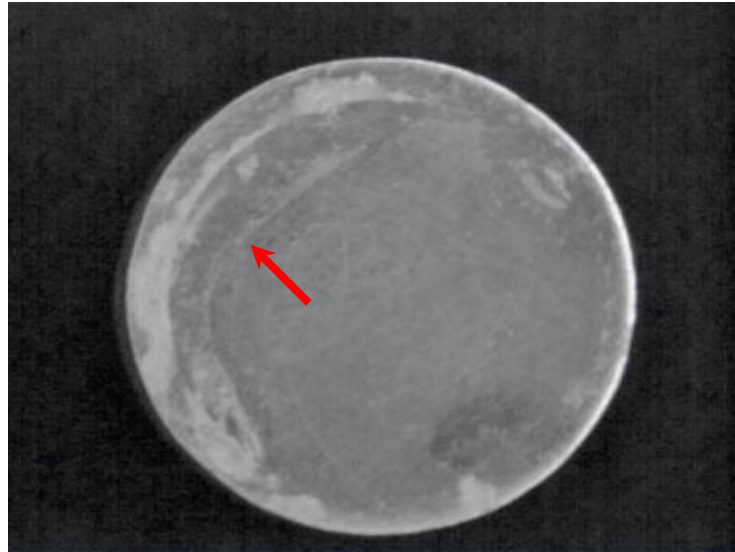
Foi executado a obtenção das imagens de macrografia das amostras após do ensaio potenciodinâmico. As amostras envolvem ao ensaio potencioestático conforme as Figuras 13 a 16.

Figura 17. Liga AA5052 H32 após o ensaio potencioestático.



Fonte: Autor

Figura 18. Amostras da liga AA5052 O após a o ensaio.



Fonte: Autor

Pode-se observar uma diferença significativa na superfície quando comparamos as amostras entre estado inicial e após o ensaio em ambiente salino. Conseguimos identificar diversos pontos de oxidação, conhecidos como “camada de óxido”, espalhados por toda área do metal.

5. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos por ensaio de névoa salina, pode-se avaliar a perda de massa das amostras encruadas e recozidas não foram suficientes para caracterização de corrosão efetiva em um período de 120 horas. Foi possível concluir que não houve uma diferença significativa de perda de massa entre as amostras com diferentes tratamentos térmicos sendo também observada pelas imagens obtidas por microscopia. Entretanto ao analisar-se os gráficos gerados pelo ensaio potenciodinâmico, pode-se observar as diferenças no comportamento das amostras frente a corrosão. Sendo que a amostra da liga encruada, mesmo apresentando um potencial um pouco maior, apresentou uma resistência á corrosão menor. Já a amostra recozida, mesmo possuindo um potencial de corrosão inferior, resistiu por mais tempo a ação da corrosão em relação a amostra encruada. Finalmente, com o cálculo da taxa de corrosão pode-se estimar que a vida útil da liga aumentou em torno de 22 vezes após o tratamento de recozimento para ambiente salino.

6. REFERÊNCIAS

ABAL (Brasil). **CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS: Têmperas**. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/>>. Acesso em: 20 out. 2018.

ALEXANDRE SARTORI (São Paulo). **Processo de Fabricação e Metalurgia do Alumínio**. Pindamonhangaba: Treinamento, 2010. 77 slides, color.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (Brasil). **Guia Técnico do Alumínio: Tratamento Térmico**. São Paulo: Abal, 2003. 149 p. (Volume 6).

COPPERMETAL (Brasil). **Alumínio Naval 5052**. Disponível em: <http://www.coppermetal.com.br/produtos_aluminio_naval5052f.html>. Acesso em: 20 out. 2018.

DAVIS, J. R. (Ed.). Forming. In: _____. **ASM specialty handbook: Aluminum and aluminum alloys**. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002.

FRANZOTT, Tatiana Cristina. **Comparativo da resistência à corrosão por pite e do comportamento mecânico de aços inoxidáveis dúplex SAF 2205 e SAF 2507**. 2010. 41 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Unifei, Itajubá, 2010. Disponível em: <https://fei.edu.br/~rodrmag/PROJETOS_IC/rel04/TCF1.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.

GOMES, Davi Pegado. **Estudo de um Procedimento de Soldagem para liga de Alumínio**. 2017. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10021235.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

INFOMET. **Tratamentos térmicos de ligas de Alumínio**. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=57>>. Acesso em: 20 out. 2018.

JAMBO, Hermano Cezar Medaber; FÓFANO, Sócrates. **Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009. 342 p.

MOURA, Alan Ribeiro de Souza; FERREIRA, Emílio Henrique Ferreira e; ARAÚJO NETO, Teodoro Macedo. **Processo de Obtenção do Alumínio**. 2008. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Para, Belém, 2008. Disponível em: <http://www.ufpa.br/getsolda/docs_graduacao/Trab_obt_aluminio.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.

NUNES, L.P, **Fundamentos de Resistência a Corrosão**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2007.

POLASTRO, Denis Santucci; ROCHA, Lucas Bittencourt. **Tratamentos Térmicos em Ligas de Alumínio Silício**. 2011. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia dos Materiais, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://biblioteca.univap.br/dados/000003/0000039C.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

RAMANATHAN, I.V. **Corrosão e seu Controle**. Editora Hemus. S/D

RIBEIRO, Lucas Lima. **Aumentar a qualidade do teste Salt-Spray, segundo a norma Internacional ISO 9227**. 201. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, Lorena, 2012. Disponível em: <<http://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2012/MEQ12029.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

RODRIGUES, Luciano Monteiro. **DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS COM NÉVOA SALINA PARA AVALIAR A RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM METAIS**. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda - Fundação Oswaldo Aranha, Volta Redonda, 2017. Disponível em: <http://web.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/luciano-monteiro-rodriques.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.

SARTORI, A.; SILVA, B. **Influência do Tempo de Exposição e Temperaturas Elevadas na Microestrutura da Liga AA5083**. In: III Congresso Internacional do Alumínio, São Paulo, 2007.

SOARES, Beatriz Maria Curtio. **ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO PARA EMBALAGEM DE BEBIDAS CARBONATADAS**. 2013. Disponível em: <http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/255959/1/Soares_BeatrizMariaCurtio_D.pdf>. Acesso em: 20 out. 2018.

WHITE MARTINS (Brasil). **Soldagem do Alumínio e suas ligas**. 2002. Disponível em: <<http://www.asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo96.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

WOLYNEC, Stephan. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: Edusp, 2013. 166 p. (II).

ZANGRANDI, AELCIO. **ALUMÍNIO E SUAS LIGAS: FUNDAMENTOS METALÚRGICOS E TECNOLÓGICOS**. Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008.