

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO
AA8011 H14 (COM E SEM PRÉ-TRATAMENTO SUPERFICIAL) E AA3104 H19
QUANDO EM CONTATO COM VINHO POR 35 DIAS**

**João Raphael Ferreira Carvalho
Rubens Lapinskas**

**Pindamonhangaba - SP
2018**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AA8011 H14 (COM E SEM PRÉ-TRATAMENTO SUPERFICIAL) E AA3104 H19 QUANDO EM CONTATO COM VINHO POR 35 DIAS

**João Raphael Ferreira Carvalho
Rubens Lapinskas**

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

Área de Concentração: Corrosão

Orientador: Prof. Msc. Alexandre Sartori

**Pindamonhangaba - SP
2018**

C253a Carvalho, João Raphael Ferreira.
Avaliação da resistência à corrosão das ligas de alumínio AA8011 H14 (com e sem pré-tratamento superficial) e AA3104 H19 quando em contato com vinho por 35 dias / João Raphael Ferreira Carvalho; Rubens Lapinskas / FATEC Pindamonhangaba, 2018.
43f.; il.

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

1. Alumínio. 2. Corrosão. 3. Vedação de garrafas. 4. Vinhos.
I. Carvalho, João Raphael Ferreira. II. Lapinskas, Rubens. III. Sartori, Alexandre. IV. Título.

CDD 669

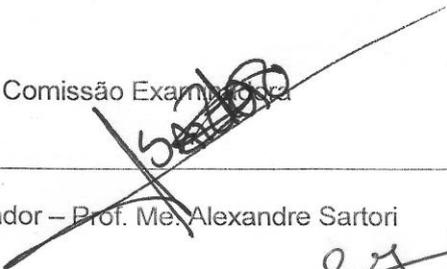
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

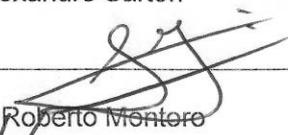
**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO
DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AA 8011 H14 (COM E
SEM PRÉ-TRATAMENTO SUPERFICIAL) E AA
3104 H19 QUANDO EM CONTATO COM VINHO
POR 35 DIAS.**

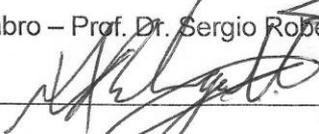
**RUBENS LAPINSKAS
JOÃO RAPHAEL FERREIRA CARVALHO**

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. Dr. Sergio Roberto Montero


Membro – Eng. Marcos Prolungatti

Pindamonhangaba, 13 de dezembro de 2018.

DEDICATÓRIA

Rubens Lapinskas

Aos professores Alexandre Sartori e Ana Paula Bleck Duque, por suas dedicações no ensino e orientação para que pudéssemos realizar este trabalho.

João Raphael Ferreira Carvalho

Em primeiro lugar a Deus que iluminou meu caminho nessa jornada e ao professor Msc, Alexandre Sartori, por sua dedicação e empenho em prol deste trabalho.

AGRADECIMENTO

Rubens Lapinskas

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, por ter me dado o dom da vida. Aos meus saudosos pais, pelos seus esforços em dar condições para que eu pudesse estudar. Aos meus irmãos, que sempre me ajudaram ao longo do tempo. À minha querida e saudosa esposa Luzia Aparecida Mendonça Lapinskas e ao meu filho, Caio Vinícius Mendonça Lapinskas, que me incentivaram e apoiaram, compreendendo os momentos de minha ausência.

Aos professores Alexandre Sartori e Ana Paula Bleck Duque, pelo inestimável apoio na orientação deste trabalho.

Aos colegas de classe, com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de conviver.

João Raphael Ferreira Carvalho

Agradeço primeiramente a Deus pois sem ele não teria forças para essa desafiante jornada. Aos meus pais António Carlos e Lucinea que sempre estiveram ao meu lado. À minha esposa Cristiane e aos meus filhos Miguel e Lucas que não me deram somente força mas apoio para vencer todas as etapas da vida acadêmica. Obrigado por suportarem minha ausência e em muitos momentos minha falta de paciência. Amo vocês.

A todos os Professores em especial Alexandre Sartori e Ana Paula, pelo grande apoio na confecção deste trabalho.

Aos amigos de classe que em muitos momentos foram força extra para cada barreira vencida.

Plante seu jardim e decore sua alma, ao invés de esperar que alguém lhe traga flores. E você aprende que realmente pode suportar, que realmente é forte, e que pode ir muito mais longe depois de pensar que não se pode mais. E que realmente a vida tem valor e que você tem valor diante da vida.

William Shakespeare

LAPINSKAS, R.; CARVALHO, J. R. F. **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AA8011 H14 (COM E SEM PRÉ-TRATAMENTO SUPERFICIAL) E AA3104 H19 QUANDO EM CONTATO COM VINHO POR 35 DIAS.** 2018. p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2018.

RESUMO

A vedação das garrafas tem sido a preocupação de produtores e consumidores de vinho, desde que começou a ser produzido, séculos atrás. Atualmente, os aspectos ecológicos e econômicos levam a deparar com a necessidade de serem utilizados materiais que atendam às exigências de preservação da qualidade dos vinhos. Essa tem sido uma das preocupações que a indústria vinícola apresenta, juntamente com a necessidade de usar técnicas e materiais que atendam esses requisitos e apresentem alternativas. Neste trabalho foi feita a comparação de duas ligas de alumínio quanto ao aspecto de resistência à corrosão na presença de vinho, que possa permitir escolher qual material é o mais adequado para a fabricação de tampas para as garrafas.

Palavras-chave: vinhos, vedação de garrafas, alumínio, corrosão

LAPINSKAS, R.; CARVALHO, J. R. F. **Evaluation of Corrosion Resistance of Aluminum Alloy AA8011 H14 (With and Without Pre-Surface Treatment) and AA3104 H19 When In Contact With Wine For 35 Days.** 2018. p. Graduation Project (Metallurgical Processes course). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2018.

ABSTRACT

Bottle fills have been the concern of wine producers and consumers since they began to be produced centuries ago. Currently, the ecological and economic aspects lead to the need to use materials that meet the requirements of preserving the quality of wines. This has been one of the concerns that the wine industry presents, along with the need to use techniques and materials that meet those requirements and present alternatives. In this work, two aluminum alloys were compared to the corrosion resistance in the presence of wine, which could allow to choose which material is most suitable for the manufacture of bottle caps.

Keywords: wine, bottle sealing, aluminum, corrosion.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grau de Encruamento em relação à deformação.....	23
Tabela 2 – Composição química da liga AA3104.....	28
Tabela 3 – Composição química da liga AA 8011	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ligas de alumínio tratáveis e trabalháveis.....	17
Figura 2 – Esquema de laminação a quente	24
Figura 3 – Esquema de laminação a frio	24
Figura 4 – Esquema de alongamento dos grãos	25
Figura 5 – Distribuição uniforme das discordâncias.....	26
Figura 6 – Discordâncias em material encruado.....	27
Figura 7 – Chapas de alumínio mergulhadas em vinho	36
Figura 8 - Chapas de alumínio após removidas do vinho	37
Figura 9 - Chapa de alumínio AA8011 H14 com tratamento e corrosão em linha. ..	37
Figura 10 - Chapa de alumínio AA8011 H14 sem tratamento e corrosão espalhada	37
Figura 11 – Chapa de alumínio AA3104 H19sem sinais de corrosão	38
Figura 12 - Detalhe da corrosão da chapa de alumínio AA8011H14 com tratamento Superficial	38
Figura 13 - Detalhe da corrosão da chapa de alumínio AA8011H14 sem tratamento superficial	38
Figura 14 - Micrografia da liga AA3104 H19 (500x)	38
Figura 15 - Micrografia da liga AA8011 H14 (500x)	38
Figura 16 – Chapa de alumínio AA8011 H14 apresentando risco na superfície antes do Ensaio.....	39

LISTA DE ABREVIACÃO

ABAL – Associação Brasileira de Alumínio

EDE – Energia de Defeito de Empilhamento

MPa Unidade de resistência – Mega Pascal

°C Unidade de temperatura – graus Celsius

B Elemento químico – Boro

Cu Elemento químico – cobre

Fe Elemento químico – Ferro

Mg Elemento químico – magnésio

Mn Elemento químico – manganês

Si Elemento químico – Silício

Ti Elemento químico - Titânio

Zn Elemento químico - Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 ALUMÍNIO	15
2.1.1 Características do Alumínio	15
2.1.2 História do Alumínio.....	15
2.1.3 Obtenção do Alumínio	16
2.1.4 Características Metalúrgicas.....	16
2.1.5 Grupos de Ligas de Alumínio.....	16
2.1.6 Têmperas de Ligas de Alumínio	19
2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DE HOMOGENEIZAÇÃO.....	23
2.3 ASPECTOS METALÚRGICOS DURANTE DEFORMAÇÃO A QUENTE	24
2.4 PARTÍCULAS DE SEGUNDA FASE.....	25
2.5 ENCRUAMENTO.....	25
2.6 ESTADO RECUPERADO	26
2.7 RECRISTALIZAÇÃO	27
2.8 CRESCIMENTO DE GRÃO.....	28
2.9 LIGAS DE ALUMÍNIO-MANGANÊS AA3104 H19.....	28
2.10 LIGAS DE ALUMÍNIO AA8011 H14.....	29
2.11 TIPOS DE CORROSÃO.....	29
2.12 TRATAMENTO SUPERFICIAL DO ALUMÍNIO.....	33
3 METODOLOGIA E COLETA DE DADOS	36
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	36
3.2 MÉTODOS	36
4 RESULTADOS	37
4.1 ANÁLISE VISUAL E METALOGRAFICA.....	37
4.2 ANÁLISE MICROGRÁFICA.....	38
4.3 DISCUSSÃO.....	39
5 CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

O mercado está sempre exigindo novos requisitos que os materiais devem atender e também buscando alternativas. Isso se aplica a todos os segmentos produtores e consumidores. E a indústria do vinho não é exceção.

Tradicionalmente, as garrafas de vinho têm sido vedadas com rolhas há séculos. Mas a indústria dos vinhos tem se mobilizado no sentido de mudar essa forma de vedação das garrafas, utilizando tampas de metal com rosca (também conhecidas como “screw caps”), dando preferência ao alumínio.

Conforme Smolec (2014), “um dos mitos mais fortes é que este sistema só se destina para vinhos baratos e de consumo imediato. Mas não é mais que uma barreira psicológica que demonstra que frente ao vinho às vezes somos muito tradicionais”. Essa tese pode ser derrubada pelas novas tecnologias que permitem fabricá-las de modo a suprir as necessidades de armazenamento de cada tipo de vinho. Com base na opinião do Master of Wine Dirceu Vianna Júnior, embora as discussões ainda persistam sobre o melhor tipo de fechamento das garrafas, a tendência a médio e longo prazo é que haja mais aceitação de inovações nesse campo, já que a maior resistência à mudança é feita por pessoas mais tradicionais, enquanto as mais jovens as aceitam bem. Uma das razões alegadas é o “charme” de se abrir uma garrafa de vinho usando um saca-rolhas, o qual muitos apreciadores não querem perder. Mas, segundo Teixeira (2011), o presidente da Associação Brasileira de Sommeliers afirmou que em 30 anos a tampa de rosca vai ser regra.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi comparar a resistência à corrosão entre duas ligas de alumínio em presença do vinho, de modo a apresentar um material mais adequado à fabricação das tampas. Além do que, essas tampas não são apenas recicláveis mas também poderão ser reutilizadas em seu formato original.

1.2 JUSTIFICATIVA

A busca de uma alternativa para substituir as tradicionais rolhas de cortiça no fechamento das garrafas se baseia em alguns pontos muito discutidos entre os produtores e consumidores de vinho. Um deles diz respeito à ecologia, já que o Sobreiro, que fornece a matéria-prima para a fabricação das rolhas, está em extinção (a casca do seu tronco só pode ser retirada depois que a planta completa 30 anos, e após isso, somente a cada 9 anos). O outro é econômico, considerando que o custo de tampas de alumínio é menor que o de cortiça, além de ser reciclável. Pode-se, então, concluir que as perspectivas desse mercado são promissoras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALUMÍNIO

Foram feitos aqui alguns comentários e passadas algumas informações sobre os métodos de obtenção do alumínio e suas ligas, bem como seus tratamentos térmicos e mecânicos.

2.1.1 Características do Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na superfície terrestre, ficando atrás apenas do silício e do oxigênio, e sendo o primeiro metálico. Seu símbolo químico é Al e seu número atômico é 13, é bom condutor de calor e eletricidade, facilmente conformável e 100% reciclável. Tem baixa massa específica ($2,7 \text{ g/cm}^3$), representando cerca de um terço da massa específica do aço. Seu ponto de fusão é cerca de 660°C . Misturado com outros metais (formando as ligas) e submetido a tratamentos térmicos, conformação mecânica e tratamentos de superfície, pode adquirir diversas propriedades, principalmente aliando leveza à resistência mecânica e à corrosão (ABAL, 2015)

É empregado em muitos setores, como indústria aeroespacial, automotiva, farmacêutica, alimentícia, naval, construção civil, computação, etc. (Sartori, 2004).

2.1.2 História do Alumínio

Apesar de sua abundância na crosta terrestre, o alumínio é o metal de uso industrial mais recente. Embora há cerca de 6000 a.C. os persas já fabricassem vasos de argila que continha óxido de alumínio, foi apenas em 1809 que Sir Humphrey Davy fundiu ferro na presença de alumina. Em 1821, o francês P. Berthier descobriu um minério que continha 52% de óxido de alumínio, próximo à cidade de Baux (de onde se originou o nome bauxita) (ABAL, 2017).

O alumínio foi obtido pela primeira vez por Hans Christian Orsted, em 1825, e isolado por Friedrich Wöhler, em 1827. Em 1855 foi mostrado pela primeira vez um lingote de alumínio na exposição de Paris, produzido pela redução eletrolítica da alumina em criolita fundida (ABAL, 2007). Em 1886 o processo eletrolítico para a redução do alumínio foi desenvolvido pelo norte-americano Charles Martin Hall e pelo francês Paul Louis Toussaint Héroult, separadamente, mas de forma simultânea, bem como sua patente. A partir daí, ficou conhecido como Processo Hall-Héroult, permitindo a produção de alumínio em escala industrial. Em 1889, Freidrich Bayer desenvolveu o processo para a produção de alumina, que leva seu nome (processo Bayer) e que é utilizado até hoje (SARTORI, 2004).

2.1.3 Obtenção do Alumínio

O alumínio não é encontrado em estado puro na natureza, mas na forma de óxido Al_2O_3 (a alumina), que está na bauxita. O primeiro passo é separar a alumina contida na bauxita, o que é feito através do processo Bayer. Uma vez realizada essa separação, a alumina é colocada em criolita fundida, e o alumínio é separado por eletrólise (processo Hall-Héroult) (SARTORI, 2009)

Para informação: para cada 5 kg de bauxita são produzidos 2 kg de alumina, que resultam em 1 kg de alumínio (SARTORI, 2009).

2.1.4 Características Metalúrgicas

O alumínio tem uma estrutura cúbica de faces centradas. Apresenta massa específica de $2,7 \text{ g/cm}^3$, o que equivale a cerca de um terço daquela do aço, que é de $7,85 \text{ g/cm}^3$. No estado puro sua resistência mecânica é muito baixa. Mas suas propriedades podem ser alteradas com adição de elementos de liga como manganês, magnésio, cobre, lítio e outros, bem como através de tratamentos térmicos e conformação mecânica (ABAL, 2015)

O alumínio tem alta condutividade elétrica e térmica, por isso é bastante utilizado na fabricação de componentes eletrônicos, de utensílios de cozinha e na indústria alimentícia. Também tem propriedades reflexivas, sendo utilizado na fabricação de luminárias (SARTORI, 2009).

2.1.5 Grupos de Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio são classificadas em grupos, através de um código de quatro dígitos.

O primeiro dígito se refere ao grupo da liga. O segundo se refere às modificações que a liga pode ter sofrido ou aos teores de impureza. Os dois últimos dígitos referem-se à sequência de registro da liga em seu grupo, exceto para a liga 1XXX, que se referem ao seu grau de pureza (SARTORI, 2009).

A Figura 1 a seguir, mostra um resumo das ligas de alumínio tratáveis e trabalháveis.

Figura 1 – Ligas de alumínio tratáveis e trabalháveis.

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

O primeiro dígito classifica a série de liga ou o elemento de liga principal.
 O segundo dígito significa uma modificação da liga original.
 O terceiro e quarto dígito significa uma sequência de registro da liga ou para série 1XXX o grau de pureza.

(Fonte: SARTORI, 2004)

a) Grupo 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 (SARTORI, 2004).

Aumentos moderados na resistência podem ser obtidos por endurecimento por deformação (encruamento). Ferro e silício são as maiores impurezas (SARTORI, 2004).

b) Grupo 2XXX

Cobre é o elemento de liga principal neste grupo. 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 (SARTORI, 2004).

Este tratamento aumenta o limite de escoamento, com conseqüente 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. A liga AA2024 é talvez a mais conhecida do grupo, é amplamente utilizada na indústria aeronáutica (SARTORI, 2004).

c) Grupo 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).

d) Grupo 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).

e) Grupo 5XXX

Magnésio é um dos elementos de liga para o alumínio mais efetivos e amplamente utilizados. Quando usado como elemento de liga principal ou com manganês, resulta em uma liga não tratável termicamente com resistência mecânica de moderada a alta. Magnésio é mais efetivo que o manganês. Como endurecedor, cerca de 0,8% de magnésio equivale a 1,25% de manganês e pode ser adicionado em quantidades consideravelmente maiores. Ligas nestas séries possuem boas características de soldagem e boa resistência à corrosão em atmosfera marítima. No entanto, certas limitações devem ser observadas na quantidade de trabalho a frio e nas temperaturas de trabalho permitidas para as ligas que contêm teores de Mg acima de 3%, de forma a evitar suscetibilidade à corrosão sob tensão e esfoliação (SARTORI, 2004).

f) Grupo 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 AA6061, uma das mais versáteis tratáveis termicamente (SARTORI, 2004).

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).

g) Grupo 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).

h) Grupo 8XXX

Ligas de alumínio que não se enquadram em nenhum dos grupos acima (SARTORI, 2004).

2.1.6 – Têmperas das Ligas de Alumínio

Diferentemente do usado para os aços, o termo “têmpera” para o alumínio e suas ligas é a denominação dada às alterações das suas propriedades estruturais por meio de trabalhos mecânicos a frio ou a quente e/ou tratamentos térmicos. Por isso, as ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos: as ligas tratáveis termicamente e as não-tratáveis termicamente (SARTORI, 2017).

2.1.6.1 Principais Tratamentos – Ligas Tratáveis Termicamente

2.1.6.1.1 *Recozimento*

Tratamento destinado a aliviar totalmente as tensões resultantes de deformações plásticas

e de tratamentos térmicos anteriores, através do amolecimento do material (SARTORI, 2017).

2.1.6.1.2 Alívio de Tensões

Tratamento destinado a diminuir as tensões residuais resultantes de conformação, soldagem ou encruamento, sem crescimento significativo de grãos (SARTORI, 2017).

2.1.6.1.3 Solubilização

Tratamento que consiste em aquecer o material a temperaturas elevadas para alguns elementos de liga ficar em solução sólida e resfriá-lo bruscamente, mantendo esses elementos em solução sólida supersaturada (SARTORI, 2017).

2.1.6.1.4 Envelhecimento Natural

O aumento da resistência do material se dá de maneira natural, pela precipitação espontânea à temperatura ambiente de solução sólida supersaturada dos seus constituintes (SARTORI, 2017).

2.1.6.1.5 Envelhecimento Artificial

Tratamento térmico efetuado a cerca de 180°C para aumento de sua resistência mecânica, com a precipitação da solução sólida supersaturada de seus componentes (SARTORI, 2017).

2.1.6.1.6 Sobreenvelhecimento

Trata-se de um envelhecimento artificial em que a precipitação dos constituintes da solução supersaturada é contínua, além do ponto de resistência máxima, com a intenção de controlar alguma característica especial como a resistência à corrosão sob tensão (SARTORI, 2017).

2.1.6.1.7 Estabilização

Tratamento térmico que promove estabilidade dimensional e de propriedades mecânicas, principalmente nas ligas de alumínio-magnésio encruadas (SARTORI, 2017).

2.1.6.1.8 Reozimento Parcial

Tratamento térmico ao qual um material encruado plasticamente a frio é submetido, para diminuir sua resistência mecânica a um nível controlado (SARTORI, 2017).

2.1.6.1.9 Homogeneização

Tratamento térmico realizado em altas temperaturas e por longo tempo, para eliminar ou reduzir segregações oriundas da fundição (SARTORI, 2017).

2.1.6.2 Designação das Têmperas - Ligas Tratáveis Termicamente

A designação das têmperas se baseia na sequência dos tratamentos dos produtos laminados, usando-se uma letra seguida de um ou mais dígitos (SARTORI, 2017).

2.1.6.2.1 Como Fabricado - F

Emprega-se aos produtos obtidos por conformação a quente, sem que tenha havido controle especial sobre suas condições térmicas ou de encruamento. Não há especificação de suas propriedades mecânicas (SARTORI, 2017).

2.1.6.2.2 Re cozido - O

Aplica-se ao material acabado, em seu estado de menor propriedade mecânica (SARTORI, 2017).

2.1.6.2.3 Solubilizado – W

Denominação empregada apenas às ligas que envelhecem naturalmente após o tratamento de solubilização (SARTORI, 2017).

2.1.6.2.4 Encruamento – H

Usada para as ligas cuja resistência mecânica foi aumentada por deformação plástica a frio, podendo ou não ser submetidas a um tratamento térmico de recozimento complementar posterior, para um amolecimento parcial ou para estabilização (SARTORI, 2017).

2.1.6.3 - Designação das Têmperas T - Ligas Tratáveis Termicamente

Esta denominação é composta pela letra “T” seguida de números 1 a 10, que indicam sequencias específicas de tratamentos básicos (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.1 T1 – Designa um material que sofreu resfriamento brusco após ter sofrido deformação a uma temperatura elevada e envelhecido naturalmente, até uma condição estável, sem passar por deformação plástica após resfriado (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.2 *T2* – Material que sofreu resfriamento brusco após ter sofrido deformação a quente e envelhecido naturalmente, até uma condição estável, com deformação plástica após resfriado, para aumento de resistência mecânica (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.3 *T3* – Material que sofreu deformação plástica a frio após ter sido submetido a tratamento de solubilização, seguindo envelhecimento natural até sua estabilização (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.3 *T4* – Material solubilizado sem passar por deformação plástica a frio, seguido de envelhecimento natural (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.4 *T5* – Material que sofreu deformação plástica a quente e resfriado bruscamente, sem posterior deformação a frio (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.5 *T6* – Solubilizado e envelhecido artificialmente, sem posterior trabalho mecânico a frio (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.6 *T7* – Solubilizado e sobre-envelhecido, tendo sido submetido a um tratamento de solubilização e estabilizado, mas continuando o processo de envelhecimento além do ponto de maior resistência, para obtenção de alguma característica especial, como resistência à corrosão sob tensão (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.7 *T8* – Produtos solubilizados e submetidos à deformação plástica a frio, seguida de envelhecimento artificial (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.8 *T9* – Materiais solubilizados, envelhecidos e submetidos à deformação plástica a frio (SARTORI, 2017).

2.1.6.3.9 *T10* – Materiais submetidos a um tratamento de solubilização, resfriados bruscamente, submetidos a uma deformação plástica a frio e envelhecidos artificialmente (SARTORI, 2017).

2.1.6.4 - Designação das Têmperas H - Ligas Não-Tratáveis Termicamente

Esta denominação é composta pela letra “H” seguida de dois dígitos, sendo que o primeiro indica o processo ao qual o material foi submetido e o segundo ao grau de encruamento (SARTORI, 2017).

2.1.6.4.1 H1 – Somente Encruamento

Produtos que sofrem deformação plástica a frio, sem recozimento posterior. O segundo dígito indica o grau de encruamento, em porcentagem (SARTORI, 2017).

2.1.6.4.2 H2 – Deformado Plasticamente a Frio e Parcialmente Recozido

Material que sofreu deformação plástica a frio, em maior grau que o desejado. A seguir sofre um recozimento para reduzir a resistência ao nível desejado. O segundo dígito especifica o grau de encruamento que permanece após o recozimento (SARTORI, 2017).

2.1.6.4.3 H3 – Deformado Plasticamente a Frio e Estabilizado

Produtos que sofrem deformação plástica a frio, e suas propriedades mecânicas são estabilizadas por um tratamento térmico a baixa temperatura. Isso se aplica às ligas que contêm magnésio, para que não venham a amolecer gradualmente à temperatura ambiente. O segundo dígito indica o grau de encruamento antes do tratamento de estabilização (SARTORI, 2017).

2.1.6.4.4 H4 – Deformado Plasticamente a Frio e Pintado ou Envernizado

Produtos deformados a frio e posteriormente pintados ou envernizados. O segundo dígito indica o grau de encruamento após o tratamento térmico de cura da tinta ou do verniz (SARTORI, 2017).

O segundo dígito têm os valores conforme indicados na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Grau de Encruamento com Relação à Deformação

Grau	Termo Comumente Usado	Redução Aproximada (%)
1	1/8	15
2	1/4	20
4	1/2	35
6	3/4	60
8	Duro	75
9	Extra Duro	85

Fonte: SARTORI, 2017.

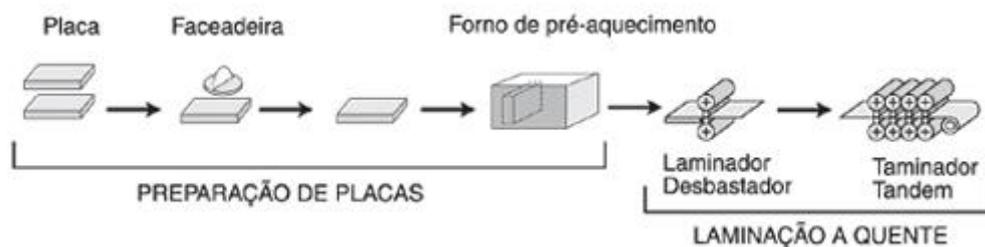
2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DE HOMOGENEIZAÇÃO

Tratamento térmico que se aplica nas ligas de alumínio antes da laminação a quente. Seu objetivo é tornar a sua composição química mais homogênea, melhorar sua estrutura e ao mesmo tempo aquecer os lingotes, favorecendo o processo de laminação (HATCH, 1984).

As partículas de segunda fase se formam nas regiões dendríticas. Essas partículas estão em grande quantidade nas ligas de alumínio comercialmente puro e seu tamanho e formato estão relacionados com a cinética da solidificação. Elas podem ser solubilizadas durante o tratamento de homogeneização, com controle de tamanho e forma dos precipitados a se tornarem arredondados e ter seu crescimento a partir das menores (HATCH, 1984).

A Figura 2 mostra o esquema de laminação a quente, a seguir (MINATEL, 2009).

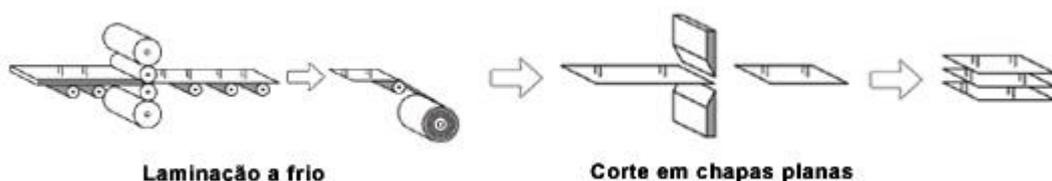
Figura 2 - Esquema de laminação a quente.



(ABAL, 2018)

Ao sair do laminador, a temperatura da peça é de aproximadamente 300°C, o que favorece a recristalização, possibilitando amenizar as discordâncias do material. A seguir a peça vai para a laminação a frio, ocorrendo o encruamento do material. Com a laminação a espessura do material é reduzida até a espessura desejada. Também pode ser submetido a tratamentos térmicos e ser cortada em tiras e discos. A Figura 3 mostra o esquema de laminação a frio, a seguir (MINATEL, 2009).

Figura 3 – Esquema de laminação a frio.



(ABAL, 2018)

2.3 ASPECTOS METALÚRGICOS DURANTE A DEFORMAÇÃO A QUENTE

A laminação a frio é realizada à temperatura abaixo daquela de recristalização, encruando o alumínio e, conseqüentemente, aumentam sua resistência à tração, seu limite de escoamento e diminuindo sua ductilidade. Tratamentos térmicos de recozimento podem facilitar a laminação

posterior ou determinar têmperas específicas (ABAL, 2008). Este procedimento proporciona um bom acabamento superficial e dimensional às chapas, o que justifica seu uso em produtos estampados (ABAL, 2008).

2.4 PARTÍCULAS DE SEGUNDA FASE

As partículas de segunda fase influenciam na movimentac o das discordâncias dos materiais e formam barreiras a seus movimentos. Em consequência, influenciam suas propriedades mecânicas (PADILHA; SICILIANO, 2005).

Essas partículas espalhadas no material interferem no movimento das discordâncias, especialmente após trabalho a frio. Seu tamanho e espaamento influem nessa movimentac o, que   notada quando comparada com materiais de mesma composio, mas sem essas partículas (PADILHA; SICILIANO, 2005).

Basicamente, existem dois tipos de partículas em uma mesma microestrutura: as finas e as grossas, as quais tem influência no trabalho a frio (PADILHA; SICILIANO, 2005).

Durante a deformac o, as partículas grossas criam regiões de discordâncias bastante concentradas e prevalece uma mesma orientao dos grãos, sendo o ponto de núcleos de recristalizao, o que acelera este processo (PADILHA; SICILIANO, 2005).

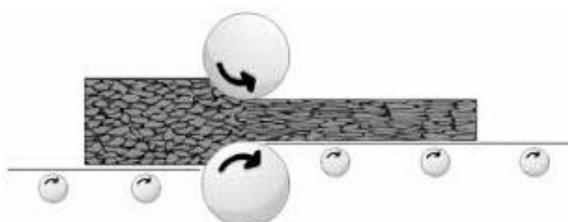
Com as partículas finas há deformac o plástica, prevalecendo o processo de recuperao ao invés da recristalizao, por causa da proximidade das partículas pequenas precipitadas, que impedem a movimentac o das discordâncias (PADILHA; SICILIANO, 2005).

2.5 ENCRUAMENTO

Encruamento   a quantidade de energia acumulada em um material após sua deformac o a frio. Quanto maior a deformac o, maior o grau de encruamento (MINATEL, 2009).

Cerca de 2% a 10% da energia da deformac o a frio ficam armazenados no material na forma de defeitos. O resto   dissipado na forma de calor. Neste processo a forma dos grãos   alterada, passando de equiaxiais para alongados, com seu eixo no sentido da laminao, conforme Figura 4, a seguir (PADILHA; SICILIANO, 2005).

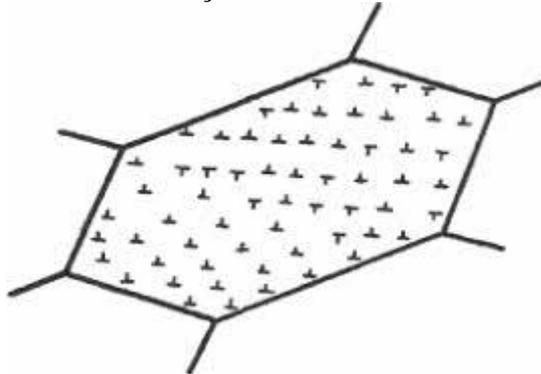
Figura 4: Esquema de alongamento dos grãos, durante processo de laminao a frio.



Fonte: PROCESSO de laminao a frio GIF. 2017

Um fator de grande influência para a distribuição das discordâncias entre os vários materiais é a EDE (Energia de Defeito de Empilhamento). Quando se deforma um metal de baixa EDE suas discordâncias têm baixa mobilidade, já que há muito afastamento entre elas e se distribuem uniformemente na estrutura, conforme Figura 5, a seguir (SARTORI, 2017).

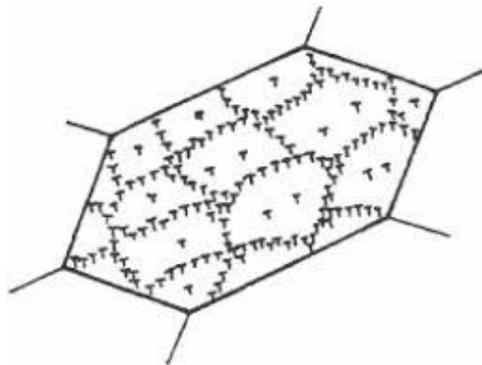
Figura 5 – Distribuição uniforme das discordâncias.



Fonte: (PADILHA; SICILIANO, 2005)

Materiais com alta EDE apresentam discordâncias dissociadas em parciais próximas umas das outras, com alta mobilidade e podem vir a se aniquilarem mutuamente com aquelas com sinal oposto, apresentando uma distribuição heterogênea, como a da Figura 6 (SARTORI, 2017):

Figura 6 – Discordâncias em material encruado.



Fonte: (PADILHA; SICILIANO, 2005)

2.6 ESTADO RECUPERADO

A recuperação é tida como uma série de fenômenos que diminuem a energia armazenada no material, sem que haja migração de contornos de alto ângulo. Quando a deformação é homogênea temos as discordâncias como bipolos. Portanto, considerando que cada discordância tenha uma outra em sentido contrário à sua nas proximidades, haverá uma aniquilação entre si, por meio de uma combinação de deslizamentos (SARTORI, 2017).

Mas, a maioria das deformações não é homogênea, não encontrando seus pares para se

aniquilarem (SARTORI, 2017).

Na recuperação de ligas de alumínio comercialmente puro ocorre a aniquilação de discordâncias nas paredes das células formando subgrãos e, posteriormente, o crescimento desses subgrãos. Esse crescimento depende da distribuição e tamanho dos grãos, da quantidade e distribuição de energia e da mobilidade dos contornos de baixo ângulo (CBA). A migração dos CBA é importante durante a recuperação e na formação dos núcleos de recristalização (SARTORI, 2017).

O processo de recuperação se dá de duas formas: durante a fase inicial do recozimento do material previamente deformado (chamado de estática) ou simultaneamente à deformação a quente (chamada de dinâmica) (SARTORI, 2017).

Em condição prática, as propriedades mecânicas das ligas de alumínio endurecidas por deformação a frio são recuperadas ou recristalizadas na faixa entre 175°C e 300°C, sendo possível controlar resistência e ductilidade durante o recozimento (SARTORI, 2017).

2.7 RECRISTALIZAÇÃO

A recristalização é a eliminação de defeitos através da migração de contornos de alto ângulo, com uso da energia acumulada em sua microestrutura. A recristalização começa quando o material é aquecido à uma temperatura suficientemente alta para que haja nucleação e crescimento de novos grãos. Permanecendo por tempo suficiente, a matriz deformada será totalmente desfeita e a recristalização completada (SARTORI, 2017).

As heterogeneidades ocorridas durante o processo de deformação agem como pontos de partida para a nucleação de novos grãos, além de serem de vários tipos, como bandas de deformação ou de transição, bandas de cisalhamento e maclas de deformação. Os pontos de nucleação são os subgrãos existentes na microestrutura deformada e seu tamanho médio e orientação dependem do histórico do processamento (SARTORI, 2017).

A energia dessas bandas pode ser diferente daquela armazenada na matriz, o que favorece a nucleação. Alumínio com alta EDE tem sua recuperação mais rápida, com crescimento dos subgrãos, aumentando a diferença de orientação entre os vizinhos. O núcleo formado irá crescer dentro da matriz deformada por causa da diferença de energia armazenada entre o núcleo e o restante da matriz, continuando até que todos os subgrãos sejam consumidos (SARTORI, 2017).

A composição química influencia muito, pois à medida que são inseridos elementos de liga no alumínio puro sua temperatura de recristalização aumenta significativamente (SARTORI, 2017).

Fases dispersas no alumínio podem influir na aceleração ou no retardo da recristalização,

dependendo de seu tamanho, espaçamento e temperatura de recozimento (SARTORI, 2017).

O tamanho do grão resultante da recristalização é uma característica importante no material, que é influenciada pela redução aplicada. Pequenas reduções resultam em grãos grandes e à medida que essa redução aumenta os grãos se tornam menores. A temperatura de recozimento também influencia o tamanho dos grãos. Em fornos contínuos, com rápido aumento da temperatura, os grãos tendem a ser mais finos (SARTORI, 2017).

Outro fator de influência no tamanho de grãos é a composição química. Elementos como ferro, manganês, cobre e magnésio diminuem o tamanho dos grãos (SARTORI, 2017).

2.8 CRESCIMENTO DE GRÃO

A permanência em temperaturas prolongadas após a recristalização leva ao crescimento dos grãos. Esse crescimento pode ser chamado de normal ou anormal. No crescimento normal o grão aumenta de maneira uniforme. Isso acontece quando grãos eliminam outros menores com formas ou orientações desfavoráveis nas suas proximidades. Grãos grosseiros podem ocorrer em alumínio comercialmente puro, mas sua mobilidade é restringida por impurezas ou elementos de liga como manganês e cromo, que limitam seu crescimento. Quando alguns grãos crescem de maneira exagerada em relação aos outros, chamamos de crescimento anormal de grãos (ou recristalização secundária), que é motivado por temperaturas exageradamente altas, com os primeiros grãos encampando os grãos vizinhos menores.

2.9 LIGAS DE ALUMÍNIO-MANGANÊS AA3104 H19

A adição de manganês confere aumento na sua resistência mecânica. Sua composição química está na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Composição química da liga AA3104, em % de peso.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Outros	Al
≤ 0,60	≤ 0,80	0,05-0,25	0,80-1,40	0,80-1,30	≤ 0,25	≤ 0,10	≤ 0,15	Rest.

Fonte: Aluminum Association

A liga utilizada foi a AA3104 H19, com as seguintes características:

- 1) Material deformado a frio, sem recozimento posterior, com redução aproximada de 85%.
- 2) Massa específica: 2,72 g/cm³
- 3) Limite de resistência à tração: 285 MPa
- 4) Limite de escoamento: 265 MPa
- 5) Alongamento típico, em 50 mm: 4,7%

Fonte: BDTD –Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, 2004.

2.10 LIGAS DE ALUMÍNIO AA8011 H14

Os principais elementos na composição dessa liga são o ferro e o silício. Sua composição química está na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Composição química da liga AA8011, em % de peso.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Outros	Al
0,50-0,90	0,60-1,00	≤ 0,10	0,20	0,05	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,10	Rest.

Fonte: Aluminum Association

A liga utilizada foi a AA8011 H14, com as seguintes características:

- 1) Material deformado a frio, sem recozimento posterior, com redução aproximada de 35%.
- 2) Massa específica: 2,70 g/cm³
- 3) Limite de resistência à tração: 120 a 210 MPa
- 4) Limite de escoamento: 110 MPa
- 5) Alongamento típico, em 50 mm: 4%
- 6) Dureza: 35 HB

Fonte: Shockmetais

2.11 CORROSÃO EM LIGAS DE ALUMÍNIO

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material metálico por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, juntamente ou não com esforços mecânicos (Gentil, V., 1996).

Apresentamos a seguir os principais tipos de corrosão em alumínio.

a) Corrosão Alveolar

A corrosão localizada se caracteriza pelo desgaste em pontos ou regiões determinadas, enquanto outras não apresentam desgaste ou mostram um desgaste muito pouco pronunciado.

A corrosão alveolar é uma forma de corrosão localizada que consiste na formação de cavidades de pouca profundidade como sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro. Ocorre em determinados pontos da superfície, enquanto o restante apresenta pouco desgaste.

A corrosão alveolar é característica de materiais heterogêneos ou de meios que apresentam heterogeneidade. Pode ser acelerada por frestas e outros fatores geradores de heterogeneidades, como cordão de solda, acúmulo de água, etc. (GENTIL V.,1996).

b) Corrosão em frestas

As frestas estão sujeitas a formação de pilhas de aeração diferencial e de concentração iônica diferencial. Quando o meio é líquido ocorrem preferencialmente as pilhas de concentração iônica diferencial, e quando o meio é gasoso, tende a ocorrer as pilhas de aeração diferencial. Frestas ocorrem normalmente em juntas soldadas com chapas sobrepostas, em juntas rebitadas, em ligações roscadas, em revestimentos com chapas aparafusadas, suporte de tubulações, flanges, dentre outras situações geradoras de frestas. De qualquer forma, as frestas deverão ser evitadas ou eliminadas por serem regiões preferenciais de corrosão (GENTIL V.,1996).

c) Corrosão filiforme

Designa-se corrosão filiforme um tipo de corrosão que se processa sob filmes de revestimentos, especialmente de pintura. Atribui-se à corrosão filiforme um mecanismo semelhante à corrosão em frestas, devido à aeração diferencial provocada por defeitos no filme de revestimento. De modo geral, o processo corrosivo começa nas bordas, progride unifilarmente, apresentando a interessante característica de refletir com o mesmo ângulo de incidência em obstáculos (GENTIL V.,1996).

d) Corrosão por micro-organismos

Trata-se da corrosão causada por micro-organismos (bactérias, fungos e algas), que atuam de maneira intensa nos processos corrosivos, principalmente nas embalagens metálicas de alimentos e em tubulações enterradas. Também pode ocorrer em cascos e hélices de embarcações (GENTIL V.,1996).

Esse processo pode se dar por:

- a) Excreção de ácidos: algumas bactérias podem oxidar o enxofre e seus compostos em ácido sulfúrico. A ação dessas bactérias se inicia em meio alcalino. Após a acidificação do meio outras espécies de bactérias que vivem em ambientes mais ácidos assumem o controle do processo de corrosão (GENTIL V.,1996).
- b) Formação de solventes orgânicos: alguns tipos de micro-organismos são capazes de metabolizar substâncias orgânicas em condições anaeróbicas, podendo ocorrer reações de fermentação. Como resultado, há formação de compostos, como CO₂, e outros que são ácidos ou solventes orgânicos, como etanol, propanol e butanol, que podem vir a reagir com os materiais do substrato natural ou sintético, causando sua degradação (GENTIL V.,1996).

c) Corrosão por outros compostos metabólicos: outro composto de corrosão microbiológica é o sulfeto de hidrogênio (H_2S), produzido por bactérias redutoras de sulfato, sulfeto e enxofre livre. O H_2S pode ser re-oxidado a ácido sulfúrico, em condições aeróbicas ou, quando na presença de nitratos, formar sulfetos. O H_2S também pode ser produzido em condições aeróbicas através da decomposição de aminoácidos sulfurados. Outro composto é a amônia, que pode ser gerada pela degradação da ureia e aminoácidos. Sais de amônia com sulfato ou cloreto são o meio adequado para as bactérias nitrificadoras (GENTIL V.,1996).

d) Corrosão sob tensão

A corrosão sob tensão ocorre quando um material é submetido a tensões aplicadas ou residuais e está exposto a um meio corrosivo. Segundo Vicente Gentil, define a corrosão sob tensão como a fratura de certos materiais quando tensionados em certos ambientes, sob condições tais que nem a sollicitação mecânica nem a corrosão ambiente poderiam, isoladamente, levar o material à fratura (GENTIL V.,1996).

e) Corrosão por empolação pelo hidrogênio

O hidrogênio atômico penetra no interior de um material metálico e se acumula em defeitos existentes, como laminações, vazios ou inclusões não metálicas. Esse hidrogênio pode ser resultante da decomposição da água de cristalização contida em revestimentos de eletrodos utilizados em processos de soldagem, reações de corrosão ou ação de gases ricos em hidrogênio. Ao se acumular e passar da forma atômica para a molecular, provoca aumento de pressão na falha e se estiver próximo à superfície, pode originar “empolamentos” (de onde se origina o nome) (GENTIL V.,1996).

g) Corrosão intergranular

A corrosão intergranular ocorre entre os contornos dos grãos de um metal policristalino, os quais em condições normais são ligeiramente mais reativos do que o interior dos grãos. Contudo, em certas condições, os contornos de grão se tornam muito reativos, ocorrendo a corrosão entre os grãos do material metálico (GENTIL V.,1996).

Esse tipo de corrosão pode ser provocado por impurezas nos contornos de grão, e quando se aumenta ou diminui a concentração destes elementos nesses locais, o metal perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando algum esforço mecânico é sollicitado, com isso, tendo-se a Corrosão sob Tensão Fraturante (CTF) (Stress Corrosion Cracking– SCC) (GENTIL V.,1996).

e) Corrosão intragranular

A corrosão intragranular ocorre nos grãos de um metal policristalino, que quando perde suas propriedades mecânicas, pode se fraturar à menor solicitação mecânica, tendo-se também Corrosão sob Tensão Fraturante (CTF). Este tipo de corrosão se processa no interior dos grãos cristalinos do material metálico, o qual, pela perda de suas propriedades mecânicas, assim como no caso da corrosão intergranular, poderá fraturar à menor solicitação mecânica com efeitos mais prejudiciais que o caso da intergranular. As variáveis do processo de propagação das tensões dependem do agente corrosivo ou do nível de tensão aplicada no material (GENTIL V.,1996).

f) Corrosão eletrolítica

Denomina-se corrosão eletrolítica aos processos corrosivos de natureza eletroquímica que ocorrem em estruturas enterradas ou submersas devido às correntes elétricas da interferência (também chamadas correntes de fuga) que abandonam o seu circuito normal para fluir pelo solo ou pela água. Quando elas atingem instalações metálicas enterradas podem ocasionar intensa corrosão localizada nas áreas onde abandonam essas instalações para retornar ao circuito original. Geralmente, as áreas corroídas se apresentam com produto de corrosão de baixa aderência, ou mesmo livre dele. Como é uma forma de corrosão localizada, em pouco tempo ocorre a perfuração da parede metálica, causando vazamentos. As correntes de fuga que produzem maiores danos são as de correntes contínuas ou as de correntes alternadas de baixa frequência. Estas correntes são devidas à deficiência de isolamento de alguma parte de um circuito que se encontra a um potencial diferente do meio. Como a resistência dos metais é muito menor que a resistência do solo ou água, as estruturas metálicas enterradas ou imersas constituem um novo circuito por onde passam as correntes de fuga (GENTIL V.,1996).

g) Corrosão por pite

Corrosão localizada, que forma pequenos furos na superfície do metal, originada por um defeito na superfície do material, uma alteração local em sua composição ou um dano na sua camada de proteção. Normalmente, crescem de cima para baixo em superfícies horizontais, e raramente em superfícies verticais. Este tipo de corrosão é extremamente insidioso, uma vez que provoca pouca perda de material com pequeno efeito sobre a sua superfície, enquanto que danifica as estruturas profundas do metal. As perfurações na superfície são muitas vezes obscurecidas por produtos de corrosão (GENTIL V.,1996).

h) Corrosão Galvânica

A corrosão galvânica é um processo eletroquímico em que um metal sofre corrosão preferencialmente em relação a outro quando os dois metais estão em contato elétrico direto e imersos em um eletrólito. Isso se deve à diferença de potencial elétrico entre os materiais em contato. Esta mesma reação galvânica é explorada em baterias primárias (como as vulgarmente chamadas de pilhas) para gerar uma tensão. A corrosão galvânica e seus processos pode ser uma das formas mais comuns e frequentes de corrosão na natureza, bem como um dos mais destrutivos (GENTIL V.,1996).

i) Corrosão por placas

A corrosão por placas se dá quando os produtos da corrosão se formam em placas que se despreendem progressivamente do material. É relativamente comum em metais que formam películas passivas (como por exemplo, o alumínio), inicialmente protetoras, porém, ao se tornarem espessas, fraturam e perdem a aderência, expondo o metal a um novo processo de corrosão (GENTIL V.,1996).

j) Esfoliação

A corrosão ocorre paralela à superfície metálica. Ocorre em chapas ou elementos metálicos que tiveram seus grãos alongados, permitindo que as segregações ou inclusões presentes no material se transformem em plaquetas alongadas devido ao trabalho mecânico. Quando se inicia um processo corrosivo na superfície do material e essas segregações ou inclusões são atingidas a corrosão se espalha através desses planos paralelos, principalmente em frestas. O produto da corrosão, então, ocasiona a separação dessas camadas, desintegrando o material na forma de placas paralelas à superfície. Essa forma de corrosão tem sido mais comumente observada em ligas de alumínio das classes 2000 (Al-Cu-Mg), 5000 (Al-Mg) e 7000 (Al, Zn, Cu, Mg) (GENTIL V.,1996).

2.12 TRATAMENTO SUPERFICIAL DO ALUMÍNIO

Todo processo que altera propositalmente a condição superficial natural de um material recebe o nome de tratamento de superfície.

No caso do alumínio, os principais tratamentos superficiais são apresentados a seguir:

- a) Cladização: consiste na deposição de alumínio metálico sobre uma ou as duas superfícies de uma chapa de alumínio, combinando as propriedades mecânicas da liga com a resistência à corrosão do alumínio (GENTIL V.,1996).

- b) **Anodização:** tem como objetivo aumentar a espessura da camada natural de óxido do alumínio, consequentemente aumentando sua resistência à corrosão. Para esse método usa-se a oxidação por meios químicos ou métodos eletrolíticos. Nos processos químicos são usadas soluções de cromatos ou dicromatos na presença de carbonatos alcalinos, em alta temperatura. A camada de óxido formada é utilizada como base para pintura, principalmente na indústria aeronáutica. (GENTIL V.,1996).

Na oxidação eletrolítica o material é colocado em solução adequada, agindo como anodo, por isso recebe o nome de anodização. A anodização permite atingir espessuras de camada de 200 µm ou mais, de boa aderência, pequena elasticidade e alta resistência à corrosão e ao desgaste mecânico (GENTIL V.,1996).

- c) **Fosfatização:** é um processo que permite dar maior aderência às tintas na superfície dos metais. Para o alumínio é utilizado fluoreto ou fluorsilicato de sódio (GENTIL V.,1996).
- d) **Metalização:** inicialmente a superfície do alumínio passa por um processo de cementação, popularmente conhecida como “zincato”, que remove a camada natural do alumínio, formando em seu lugar uma fina camada de zinco, evitando a formação de óxido nas lavagens posteriores e permitindo a eletrodeposição de outros materiais. Após essa etapa segue uma sequência básica:
- 1) Níquel fosco
 - 2) Cobre ácido brilhante
 - 3) Níquel semi brilhante
 - 4) Níquel brilhante
 - 5) Cromo (Venz, R. 2017).
- e) **Oxidação Eletrolítica de Plasma (OEP):** processo de tratamento eletroquímico, que gera revestimentos de óxidos, semelhante à anodização, porém com potencial mais alto, gerando descargas que façam o plasma alterar a estrutura da camada de óxido. Esse processo permite obter camadas de até centenas de micrômetros. Como essas camadas têm alta dureza, servem para resistência ao desgaste e como isolamento elétrico (Venz, R. 2017).

- f) Passivação: o alumínio pode ser passivado com o uso de cromo trivalente, tanto para melhorar a resistência à corrosão como servir de base para aplicação de pintura. Esses processos atuam de forma eficiente nos vários tipos de ligas de alumínio, formando uma camada de conversão de alta proteção contra corrosão, bem como torna-se um excelente primer para tintas líquidas ou à pó (Venz, R. 2017).
- g) Pintura: a pintura é uma das técnicas de proteção anticorrosiva mais empregada, devido sua facilidade de aplicação, relação custo-benefício e aplicações paralelas (como impermeabilização, estética, sinalização, evitar incrustações de micro-organismos marinhos em casco de embarcações, etc.).

A aplicação das tintas pode ser feita por quatro processos:

- 1) Imersão: as peças são imersas em um recipiente com a tinta e retiradas a seguir.
- 2) Aspersão: a tinta é forçada a passar por pequenos orifícios de um equipamento especial como:
 - uma pistola a ar comprimido, à temperatura ambiente;
 - uma pistola a ar comprimido, à quente;
 - uma pistola sem ar comprimido, com alta pressão;
 - uma pistola a ar comprimido, à temperatura ambiente;
 - uma pistola a ar comprimido, com o estabelecimento de uma ddp entre as partículas de tinta e as peças.
- 3) Trincha: com espalhamento da tinta usando pincel, de forma manual;
- 4) Rolo: para superfícies planas e relativamente grandes (GENTIL V.,1996).

3 METODOLOGIA E COLETA DE DADOS

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para a realização deste estudo utilizamos os seguintes materiais:

- I) 3 béquers de 250 ml
- II) 2 cdp's de 70 mm de largura x 100 mm de comprimento (liga AA8011 H14, com e sem tratamento superficial à base de fluoretos de sódio)
- III) 1 cdp de 70 mm de largura x 100 mm de comprimento (liga AA3104 H19, sem tratamento superficial)
- IV) 1 politriz rotativa, com tecido para polir alumínio, usando pasta de diamante e alumina coloidal, modelo AROPOL 2V, da AROTEC.
- V) 1 lixadeira rotativa com lixas de #80, #120, # 220, #320, #600, #1200, # 1600, #2000, modelo AROPOL 2V, da AROTEC.
- VI) 450 ml de vinho tinto de mesa marca Chalise

3.2 MÉTODOS

Foram colocados 150 mL de vinho tinto em cada béquer e em cada um deles uma chapa de alumínio foi mergulhada até metade de seu comprimento (50 mm). Foram deixadas pelo período de 35 dias, conforme Figura 7 a seguir. Ao final desse tempo, foi realizada uma inspeção visual de cada chapa.

Figura 7: Chapas de alumínio mergulhadas em vinho.



Fonte: autores, 2018

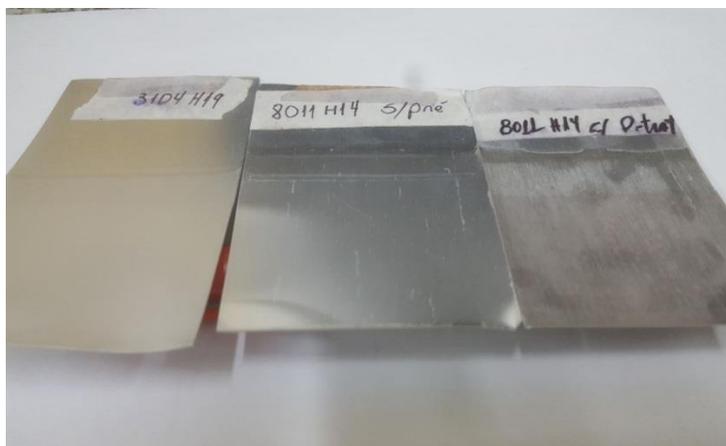
Em seguida foi recortado um pedaço de cerca de 5 mm x 15 mm de cada material, tanto da parte em contato com o vinho quanto da parte que ficou fora dele, para fins comparativos, que foram embutidos, lixados e polidos, para análise micrográfica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE VISUAL E MACROGRÁFICA

Foi notada a diferença de tonalidade superficial entre as três amostras, ficando bem definida qual parte ficou imersa e qual parte ficou fora do vinho, conforme Figura 8, a seguir.

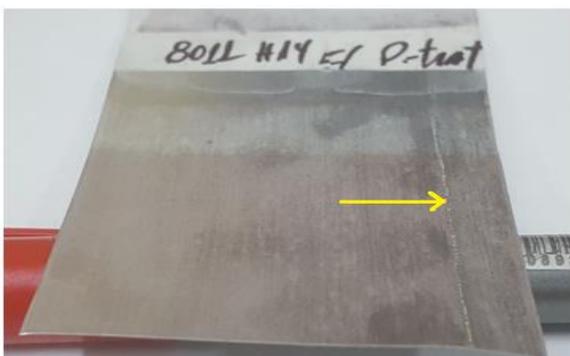
Figura 8: Chapas de alumínio após removidas do vinho.



Fonte: autores, (2018)

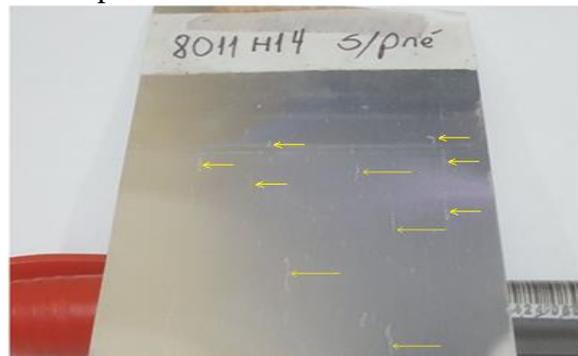
A análise visual mostrou que a superfície da amostra da liga AA8011 H14 com tratamento superficial apresentou corrosão alinhada em uma das superfícies, enquanto a da liga AA8011H14 sem tratamento teve vários pontos de corrosão nas duas faces, conforme Figuras 9 e 10, a seguir. Isso se deve à ausência de uma camada de proteção que poderia isolar o elemento corrosivo (vinho) de um contato direto com a superfície, e, conseqüentemente com as partículas de segunda fase próximo à superfície, onde se iniciou o processo corrosivo.

Figura 9: Chapa de alumínio AA8011 H14 com tratamento superficial apresentou corrosão em linha.



Fonte: autores, (2018)

Figura 10: Chapa de alumínio AA8011 H14 sem tratamento superficial apresentou corrosão espalhada.



Fonte: autores, (2018)

A chapa da liga AA3104 H19, praticamente, não apresentou nenhum tipo de corrosão, como pode ser visto na Figura 11, seguinte:

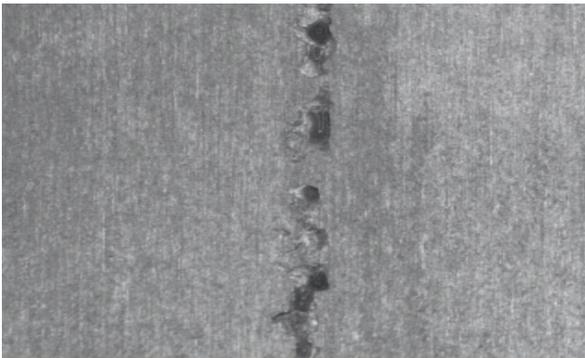
Figura 11: Chapa de alumínio AA3104 H19, não apresentando sinais de corrosão.



Fonte: autores, (2018)

Nas Figuras 12 e 13, a seguir, foram observados maiores detalhes da corrosão nas chapas das ligas 8011, com auxílio de ampliação pelo uso de lupas.

Figura 12: Detalhe da corrosão da chapa de Alumínio AA 8011 H14 com tratamento superficial (12x).



Fonte: autores, (2018)

Figura 13: Detalhe da corrosão na chapa em AA8011 H14 sem tratamento superficial (10x).

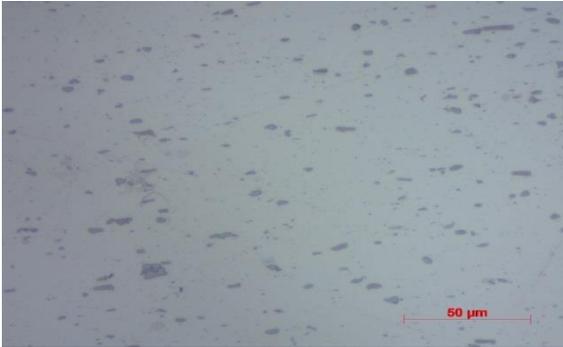


Fonte: autores, (2018)

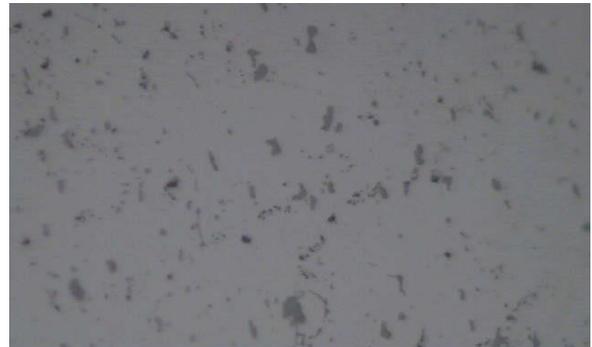
4.2 ANÁLISE MICROGRÁFICA

Através das micrografias não foi possível detectar os pontos que apresentaram corrosão. Apenas foram verificadas e comparadas as microestruturas das ligas 3104 e 8011, quanto à presença de partículas de segunda fase. As micrografias são apresentadas nas Figuras 14 e 15 a seguir.

Figura 14: Micrografia da liga AA3104 (500x) **Figura15:** Micrografia da liga AA8011 (500x)



Fonte: autores, (2018)

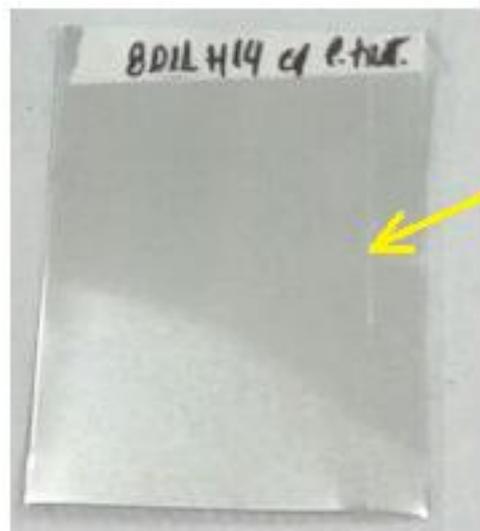


Fonte: autores, (2018)

4.3 DISCUSSÃO

A amostra da liga AA8011 H14 com pré-tratamento apresentou uma linha de corrosão ao longo de seu comprimento em uma das faces, a cerca de 10 mm de distância de uma das bordas. Essa corrosão foi propiciada por um dano superficial e consequente remoção da camada protetora pré-existente, ocorrida durante o processo de manuseio, expondo o metal diretamente ao vinho, conforme pode ser visto na Figura 16, abaixo:

Figura 16: Chapa de alumínio AA8011 H14, apresentando risco em sua superfície antes do ensaio.



Fonte: autores, (2018)

Nas amostras sem o pré-tratamento, a corrosão mostrou-se espalhada em diversas áreas das duas faces, principalmente por essa liga conter um teor mais alto de ferro em sua composição.

Também é importante considerar que durante a conformação da chapa de liga AA 8011

com pré-tratamento podem ter ocorrido danos superficiais devido ao atrito com os ferramentais, e neste caso, então, sua superfície original ficou exposta ao ambiente e ao vinho, ocorrendo o processo de corrosão.

A amostra da liga AA3104 H19 praticamente não apresentou nenhum tipo de corrosão. Isso pode ser atribuído à composição química da liga, o que a torna mais resistente à corrosão.

5 CONCLUSÃO

- 1) Após todos os ensaios realizados foi concluído que a liga AA8011 H14 sem o pré-tratamento apresentou uma resistência à corrosão menor, enquanto aquela com o pré-tratamento uma resistência melhor. Na região onde sua proteção superficial sofreu um dano e expôs sua superfície original, a corrosão foi acentuada devido à relação entre a área protegida e a área sem proteção. Dessa forma, torna-se temerário seu uso para a conformação de tampas, uma vez que qualquer dano em sua camada protetiva leva à corrosão e consequente contaminação do vinho.

- 2) A liga AA3104 H19 praticamente não sofreu corrosão, o que a torna, dentre essas ensaiadas, a que melhor correspondeu em suprir as necessidades e ter mais condição de ser usada na fabricação das tampas.

REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira de Alumínio. Guia Técnico do Alumínio - **Compatibilidade do alumínio e Suas Ligas Com Alimentos e Produtos Químicos** – setembro/2000

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio. Guia Técnico do Alumínio.** ABAL. São Paulo. 2007, p. 68.

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Tampa ou Rolha?** 2015. Disponível em: <<http://embalagensdealuminio.com.br/tampa-ou-rolha/>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e Engenharia dos Materiais** – 3ª ed., tradução norte-americana, Cengage Learning Edições Ltda - 2015

DUTRA, Aldo Cordeiro; NUNES, Laerce de Paula. **Proteção Catódica-Técnica de Combate à Corrosão** – 4ª Ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2007.

GENTIL, Vicente. **Corrosão** – 6ª ed. Ed. LTC, 2011

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

JAMBO, Hermano Cezar Medaber; FOFANO, Sócrates. **Corrosão-Fundamentos, Monitoração e Controle** – 1ª Ed. Editora Ciência Moderna.

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

NUNES, Laerce de Paula. **Fundamentos de Resistência à Corrosão.** -1ª ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2007.

PADILHA, A.F., SICILIANO, Jr. F. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. 3ª ed. ABM. São Paulo. 2005.232p.

PROCESSO de laminação a frio GIF. 2017. Disponível em: <<https://gfyat.com/FortunateDefiantBaleenwhale>>. Acesso em: 15 maio 2017.

SANTOS, Cristiane; OLIVEIRA, Julio. **Análise e reconhecimento de corrosão alveolar em superfícies metálicas utilizando sensoriamento remoto terrestre**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2017.

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

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

SARTORI, A. **Material didático apresentado em powerpoint nas aulas de Metalurgia dos Não-Ferrosos**. FATEC Pindamonhangaba. 2017.

SILVEIRA, Fernando Basílio da. **Anodização**. Revista Tratamento de Superfície, número 207, março de 2018, p. 16 a 26.

SMOLEC, Ania. **Rolha ou Tampa de Rosca?** 2014. Disponível em: <<http://cyt.dreamhosters.com/wine-blog/rolha-ou-tampa-de-rosca/>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

TEIXEIRA, Rafael. **Vinho com rosca**. Revista Isto É, de 11 de maio de 2011, edição nº 2165.

VENZ, Rainer. **Tratamento de Superfície de Alumínio – TSA**. Revista Tratamento de Superfície, número 204, setembro de 2017, p.24 a 28.

