



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Estudo de caso: Diagnóstico das possíveis causas do surgimento de manchas no processo de anodização do alumínio

Autor: Carolina Scritori Bitencourt

Orientador: Prof. Pedro Juarez Melo

Porto Alegre, novembro de 2021

Autor: Carolina Scritori Bitencourt

Estudo de caso: Diagnóstico das possíveis causas do surgimento de manchas no processo de anodização do alumínio

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientador: Prof. Pedro Juarez Melo

Banca Examinadora:

Professor Titular, Nilson Romeu Marcilio, DEQUI/UFRGS

Pós Doutorando, Alexandre Giacobbo, LACOR/UFRGS

Porto Alegre

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Departamento de Engenharia Química e a UFRGS, pela oportunidade de realizar minha formação e principalmente ao professor Pedro Melo pela atenção e ensinamentos prestados, pelo exemplo de profissional, pela constante gentileza, carinho, empatia e incentivo ao longo do curso.

A minha família que me serviu de base nesta trajetória, um agradecimento especial à minha mãe Enedê pelas palavras de incentivo e por estar sempre ao meu lado durante todos os momentos da minha graduação, principalmente em etapas difíceis do curso, pois nunca me deixou desistir. Ao meu pai, Jairo, obrigada por me incentivar a ser engenheira química e me apoiar nas minhas escolhas. Ao meu namorado, Daniel, obrigada pela paciência e amor durante estes anos, mesmo estudando sempre me apoiou e me orientou para o melhor caminho. Agradeço também a minha sogra, Noêmia, que já não estão mais aqui, mas que me deu suporte para que eu pudesse seguir minha trajetória.

Ao grupo de amigos “Os de Sempre”, Álysson, Angélica, Brenda, Bruna, Gustavo, Maria Carolina e Rickson que estiveram sempre presentes durante todos os momentos do curso, obrigada pela parceria para enfrentar momentos de dificuldade, com certeza a ajuda e todos os momentos que vivemos durante a graduação me fizeram ser uma pessoa e profissional melhor.

Aos meus amigos, que entenderam a distância física que se fez presente nos últimos anos e por não deixarem que isso afetasse a nossa amizade, obrigada pela compreensão e carinho, especialmente ao meu amigo Patricky, obrigada por todos os momentos de descontração durante minha graduação, com certeza sua amizade tornou estes anos mais leves.

Ao grupo da qualidade e engenharia de processos, obrigada pela atenção e recepção, além do aprendizado diário. Um agradecimento especial ao Gelson, William e Diego, pelo exemplo de gestão, por acreditar na minha capacidade e proporcionar meu crescimento profissional.

Enfim, obrigada a todos que de certa forma cruzaram meu caminho durante estes anos, com certeza tudo tem um porque nesta vida, nada é por acaso.

RESUMO

A empresa onde este estudo de caso foi realizado utiliza o alumínio e ligas de alumínio para a produção de peças metálicas devido a elevada resistência mecânica e, principalmente, ao baixo peso em relação a outros metais. Este tipo de liga, em algumas situações, é suscetível à corrosão, por isso se faz o processo de anodização das peças visando aumentar a proteção do material de ações corrosivas e abrasivas e obtenção de coloração para fins estéticos. Durante o processo de fabricação das peças, onde se realizam as etapas de tratamentos térmicos e, principalmente, tratamentos mecânicos e de superfície, pode surgir condição que favoreçam ou potencializem a possibilidade de ocorrer falhas, tipo manchas, que é o objetivo do presente estudo. Neste caso, é importante para a empresa conhecer o comportamento das peças durante o processo de fabricação para entender a interação entre as operações e seus resultados visando a identificação das causas do surgimento desses defeitos. Neste contexto, este estudo de caso tem como objetivo analisar as prováveis causas do defeito tipo mancha verificado após o processo de anodização das peças de liga de alumínio 7075-T6. O defeito do tipo mancha pode ser classificado de acordo com a sua característica visual e representa cerca de 20% do total de reprovações em peças de alumínio na empresa em que este estudo de caso foi realizado além de um índice de sucata, em cinco meses, de R\$600,00 mil reais. Portanto, os esforços e as pesquisas realizadas para descobrir as causas deste problema são de suma importância para aumentar a qualidade do produto e redução dos prejuízos da empresa. O presente trabalho seguiu procedimentos similares àqueles utilizados em análise de falhas, como a realização de análises metalográficas, análises de matéria prima e observação da estrutura das amostras, realização de testes em linha de produção para compreensão de etapas e operações. Os resultados obtidos mostram que a composição metalográfica e de matéria prima podem ter influência no surgimento das manchas e, além disso, durante o processo de produção algumas etapas podem apresentar condições que contribuem para o surgimento das manchas.

Palavras-chave: alumínio, anodização, manchas

ABSTRACT

This case study took place in a company that uses aluminum and its alloys to produce metallic parts due to its high mechanical strength and mainly because of its low weight. These kinds of alloys, in some situations, are sensitive to corrosion, that's why the anodizing process is utilized to increase resistance against corrosion and abrasive actions and to obtain colors for aesthetic purposes. The manufacturing process contains some operations like heat treatment, mechanical and surface treatment processes that create conditions to boost the possibility of failures like stains to occur, which is the purpose of this study. Therefore, it is important for the company to know the behavior of parts during the manufacturing process to understand the interaction between operations and its results targeting to identify the causes of the occurrences of these defects. In this context, this case study has the objective of analyzing probable causes to stain defects verified after anodizing parts of aluminum alloy 7075-T6. The stain defect can be classified according to its visual characteristics and represents about 20% of rejections in aluminum parts in the company, where the study took place, besides that the scrap rate in 5 months was about R\$ 600.000 (six hundred thousand brazilian Reais). Therefore, efforts and researches focused on finding the causes of this problem are most important to product quality and to reduce company losses. This study followed similar procedures to those used for failure analysis, like metallographic analysis, raw material analysis and observation of samples structure, production line tests to understand steps and operations of the manufacturing process. The results obtained show that metallographic formation and raw material can influence stains occurrence, besides that during the manufacturing process some steps may present conditions that contribute to stains to surface.

Keywords: *aluminum, anodizing, stains*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo térmico de solubilização e envelhecimento	3
Figura 2: Esquema que mostra os dois diferentes tipos de óxidos formados no processo de anodização: tipo barreira (a) e tipo poroso (b)	7
Figura 3: Representação da mudança de potencial da célula em um processo de anodização galvanostático e a estrutura do óxido em cada fase	8
Figura 4: Fluxograma das etapas do processo de anodização	8
Figura 5: Superfície sem o processo de neutralização, apresenta resíduos alcalinos (a). Superfície neutralizada e isenta de álcalis (b)	10
Figura 6: Tipos de acabamentos anodizados	13
Figura 7: Fluxograma geral do processo de fabricação das peças	14
Figura 8: Fluxograma do processo de anodização	14
Figura 9: Processo de anodização convencional, gancheira (a), célula anodização (b) e (c) ...	15
Figura 10: Evolução do defeito mancha de peças em alumínio	18
Figura 11: Pareto dos tipos de manchas nas peças em alumínio, fevereiro 2021	19
Figura 12: Diferentes tipos de manchas em peças anodizadas. <i>Grãos</i> (a), (b) e (c), <i>escorrido</i> (d), <i>nó de madeira</i> (e) e <i>tonalidade</i> (f)	20
Figura 13: Macrografia na região com fluxo de final de extrusão	21
Figura 14: Micrografia na região do fluxo de metal (a) e fora da região do fluxo de metal (b)	21
Figura 15: Granulação grosseira na amostra	22
Figura 16: Micrografia de amostra com mancha (a) e sem mancha (b)	23
Figura 17: Imagem realizada com MEV e detector EBSD na amostra isenta de manchas	24
Figura 18: Imagem realizada com MEV e detector EBSD na amostra manchada	25
Figura 19: Imagem da análise de MEV na região isenta de manchas (a) e na região manchada (b)	25
Figura 20: Dois fluxos produtivos diferentes	26
Figura 21: Segundo teste: retrabalho das peças no seguinte fluxo: T6, jateamento e anodização	27
Figura 22: Peças reprovadas, manchas do tipo “grãos”	27
Figura 23: Peça reprovada no teste, lado esquerdo (a), lado direito (b)	28
Figura 24: Peça lixada e anodizada (a) e peça lixada, jateada e anodizada (b)	28
Figura 25: Peça com corrosão antes (a) e após anodização (b)	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação das características dos três metais mais utilizados pela sociedade contemporânea..... 2

Tabela 2: Análise de fluorescência de raio X 23

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	Alumínio e suas ligas	2
2.2	Corrosão nas ligas de alumínio	3
2.2.1	Corrosão por pites	4
2.2.2	Corrosão intergranular	4
2.2.3	Corrosão por esfoliação	4
2.2.4	Corrosão filiforme	5
2.2.5	Corrosão sob tensão	5
2.3	Tratamentos mecânicos de superfície	5
2.3.1	Polimento	5
2.3.2	Abrasivos	6
2.3.3	Jateamento	6
2.4	Tratamentos químicos de superfícies	6
2.4.1	Anodização	6
2.5	Etapas do processo de anodização	9
2.5.1	Desengraxante/lavagem	9
2.5.2	Fosqueamento e neutralização	10
2.5.3	Coloração	11
2.5.4	Selagem	11
2.6	Análises	11
2.6.1	Metalografia	11
2.6.2	Fluorescência de Raio X	11
2.6.3	Microscopia eletrônica de varredura	12
2.7	Defeitos encontrados no processo de anodização	12
3	Materiais e Métodos	13
3.1	Fluxograma do processo	13
3.2	Parâmetros da anodização	15
3.3	Estudo de caso	16
3.4	Testes em linha de produção	16
3.5	Amostras e análises	16
3.5.1	Metalografia (macrografia e micrografia)	16
3.5.2	Fluorescência de Raio X	17
3.5.3	Microscopia eletrônica de varredura	17
3.5.4	Estudo e verificação da temperatura do forno de têmpera	17

4	Estudo de Caso	18
5	Resultados	21
5.1	Análises metalográficas	21
5.2	Análises de fluorescência de raio X	23
5.3	Microscopia eletrônica de varredura	24
5.4	Estudo e verificação da temperatura do forno de têmpera	26
5.5	Testes realizados na linha de produção da empresa	26
5.5.1	Teste 1: Avaliar o reprocessamento das peças em diferentes fluxos	26
5.5.2	Teste 2: Avaliar peças de diferentes fornecedores	27
5.5.3	Teste 3: Avaliar o processo de T6	28
5.5.4	Teste 4: Avaliar peças com diferentes geometrias	28
5.5.5	Teste 5: Avaliar o processo de anodização em empresa terceirizada	29
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	30
	REFERÊNCIAS	32

1 Introdução

A qualidade obtida na fabricação de produtos anodizados é determinante para a sua comercialização no mercado, segundo Deming (1990), sendo que esta qualidade pode ser definida como a satisfação das necessidades do cliente, em primeiro lugar. Desta forma a análise e detecção de defeitos superficiais nos componentes e no produto são de suma importância para que estes possam ser corrigidos antes que gerem prejuízos apreciáveis para a companhia.

As ligas de alumínio da série 7000 são utilizadas especialmente nas indústrias aeroespacial, automotiva e bélica, pois superam as necessidades industriais em termos de alta resistência à tração e à fadiga, principalmente nos quais o baixo peso também é um requisito, conforme Pinheiro (2019). O processo de anodização é utilizado para incrementar a resistência do componente à corrosão e ao desgaste, mas também é utilizado para realizar a coloração das superfícies por razões estéticas, segundo Trujillo (2015).

O objetivo de estudo deste trabalho são as prováveis causas que induzem a formação de manchas na superfície de uma peça utilizada na indústria metal mecânica pertencente à liga de alumínio 7075-T6 que passa por processos de conformação mecânica, tratamento térmico, usinagem e tratamento de superfície através da anodização e com acabamento nas cores vermelha, bronze, azul e branca.

Um controle satisfatório durante a fabricação destas peças, que são submetidas a vários processos e ambientes diversos, é necessário para reduzir o aparecimento de manchas nas etapas posteriores. Portanto, identificar quais os parâmetros e etapas do processo que podem favorecer ou ter influência sobre o aparecimento das manchas superficiais é um dos focos de pesquisa na empresa e do presente trabalho.

1.1 Objetivos

Este estudo de caso busca analisar as prováveis causas das manchas identificadas após o processo de anodização de uma peça de liga de alumínio 7075-T6 extrudada e usinada.

Os objetivos específicos são:

- Analisar a composição, estrutura e matéria prima do objeto de estudo através de análises metalográficas (macrografia e micrografia), fluorescência de raio X (FRX) e micrografia eletrônica de varredura (MEV) para comparar os resultados com as hipóteses e identificar quais são as possíveis causas potenciais do problema.
- Realizar testes em linha de produção com diferentes etapas e operações para avaliar qual parte do processo é mais representativa para o defeito.
- Diminuir os índices de reprovação destas peças e identificar as possíveis causas deste defeito para redução dos custos de sucata e reprocessamento.

2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção serão apresentados os fundamentos teóricos para o entendimento do processo de anodização do alumínio e suas ligas bem como as prováveis causas do surgimento de defeitos que ocorrem durante este processo de tratamento superficial em ligas de alumínio, como é o caso das manchas que ocorrem nas superfícies tratadas. A revisão da literatura é realizada abordando o alumínio e suas ligas, processos de corrosão no alumínio, os principais tipos de tratamentos mecânicos e superficiais utilizados e o processo de anodização, que visa melhorar o desempenho deste material quanto ao fenômeno da corrosão.

2.1 Alumínio e suas ligas

O Alumínio é um dos materiais mais empregados na engenharia devido a sua versatilidade e se destaca na indústria devido à sua grande variedade de aplicações, sendo usado como alumínio puro ou na forma de ligas com outros metais. Este material e suas ligas apresentam ótimas propriedades mecânicas, físicas, químicas e tribológicas conforme relatou Rana et al. (2012). Segundo Gonçalves (2012) as principais propriedades do alumínio são: Leveza, boa condutividade elétrica e térmica e uma elevada resistência à corrosão. As principais propriedades do alumínio são mostradas na Tabela 1:

Tabela 1: Comparação das características dos três metais mais utilizados pela sociedade contemporânea

Propriedades físicas típica	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm ³)	2,7	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C)	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (Mpa)	70000	205000	110000
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C)	23.10 ⁻⁶	11,7.10 ⁻⁶	16,5.10 ⁻⁶
Condutibilidade térmica a 25°C (cal/cm/°C)	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61	14,5	100

Fonte: ABAL -Associação Brasileira de Alumínio, ABAL (2021)

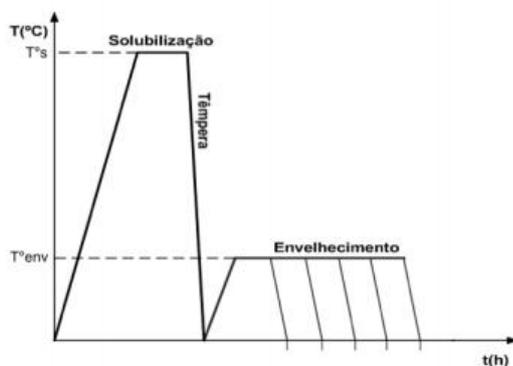
Conforme Lourenço (2014) os elementos de liga quando adicionados podem produzir desde o aumento da resistência mecânica, até outros efeitos mais específicos como o aumento da resistência à corrosão. Os elementos mais comuns presentes nas ligas de alumínio são o Mg, Mn, Fe, Si, Cu e Zn, segundo Maia (2012).

De acordo com Maia (2012) as ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos: Ligas de conformação plástica e ligas para fundição, sendo que entre as ligas de conformação plástica há uma divisão para as que podem ser tratadas termicamente e as que não são tratáveis termicamente.

A liga de alumínio 7075-T6 é utilizada em aplicações que requerem alta resistência mecânica e tenacidade como na indústria bélica e aeroespacial, segundo Canyook et al. (2018), que conforme destacou De Araújo et al. (2014) a composição contém 5,6% Zn, 2,5% Mg, 1,6% Cu e 0,30% Cr. Todas as ligas da série 7xxx que apresentam o Zn como principal elemento de liga são mais sensíveis à corrosão e apresentam fragilidade em aplicações como em altas temperaturas, por isso utiliza-se tratamentos térmicos menos severos nestas ligas para se obter uma boa combinação entre resistência à corrosão e resistência à fratura, conforme Lourenço (2014).

Esta liga pertence ao grupo de conformação plástica e pode ser tratável termicamente pelo tratamento T para aumentar a resistência do material através dos processos de solubilização e envelhecimento artificial, chamado de T6. O processo de solubilização visa solubilizar a fase endurecedora, mantendo a liga em uma condição metaestável, já o objetivo do processo de envelhecimento artificial é a precipitação controlada da fase endurecedora na matriz previamente solubilizada conforme relatou Júnior (2010). O gráfico esquemático onde mostra o processo de solubilização e envelhecimento (T6) está disposto na Figura 1.

Figura 1: Ciclo térmico de solubilização e envelhecimento



Fonte: Maia (2012)

2.2 Corrosão nas ligas de alumínio

Conforme Júnior (2010) a corrosão é um processo espontâneo de deterioração de um material metálico que altera sua durabilidade e desempenho. De acordo com Scarabotto (2018) nas reações de corrosão se forma um material diferente do original, geralmente óxidos, e com isso a liga acaba perdendo propriedades importantes como a resistência mecânica, elasticidade, ductilidade e estética.

De acordo com Pinheiro (2019) o alumínio e suas ligas são naturalmente resistentes à corrosão em meios neutros, pois tem a capacidade de formar uma camada protetora de óxidos de 2 a 3 nm de espessura em sua superfície, devido à afinidade do alumínio com o oxigênio do ar. A camada formada possui as seguintes características: compacta, amorfa,

aderente e protetiva. Segundo o diagrama de Pourbaix (diagrama potencial/pH) para o Al puro, a camada formada é estável dentro da faixa de pH de 4 a 8, fora desta faixa de pH ocorre a dissolução do alumínio deixando a superfície do metal exposto ao meio externo.

Ainda segundo Pinheiro (2019) este material e suas ligas podem sofrer corrosão de diversas formas como: pites, intergranular, esfoliação, filiforme e sob tensão, sendo a corrosão por pites a mais frequente por se tratar de um material que geralmente está no estado passivado devido a formação da camada de óxido. Villanova (2007) destacou que os defeitos que ocorrem naturalmente no óxido formado implicam diretamente na resistência à corrosão dos componentes anodizados e em fenômenos que levam à nucleação e à propagação de pites através do filme formado, expondo o material ao meio corrosivo.

2.2.1 Corrosão por pites

Segundo Mattos (2018) Pite ou Pitting é a forma de ataque corrosivo pontual que ocorre devido ao rompimento da camada passiva de óxido que protege as ligas de alumínio. Este tipo de corrosão ocorre normalmente em materiais metálicos passivos que estejam expostos em meios que contenham íons agressivos como cloretos, brometos, sulfetos e outros, segundo Scarabotto (2018).

Conforme definiu Scarabotto (2018), pode-se identificar que alguns fatores são importantes para esse tipo de corrosão:

- Contaminação da atmosfera com SO₂ e material particulado.
- Contaminação da atmosfera com NaCl.
- Presença de partículas de segunda fase e ou precipitados catódicos ou anódicos em relação à matriz em algumas ligas, com determinados tratamentos.

2.2.2 Corrosão intergranular

A formação de corrosão intergranular é mais suscetível em ligas de Al-Mg e Al-Mg-Zn, pois nestas ligas ocorre a precipitação de compostos intermetálicos nos contornos de grãos. Este tipo de corrosão se caracteriza pelo ataque localizado, preferencialmente, ao longo dos contornos de grãos, de acordo com Scarabotto (2018). Conforme Mattos (2018) há maior vulnerabilidade de geração deste tipo de corrosão em materiais com a têmpera mais lenta após solubilização, formando, assim, precipitados no contorno de grão.

2.2.3 Corrosão por esfoliação

Segundo Mattos (2018) e Scarabotto (2018) a corrosão por esfoliação é um tipo de corrosão que acontece paralelamente à superfície e gera um tipo de estufamento da parte interna do metal que fica evidente na superfície. Este tipo de corrosão é comum em ligas da série 7xxx e ocorre em chapas ou componentes extrudados e/ou laminados que tiveram seus grãos alongados e achatados.

2.2.4 Corrosão filiforme

Como definiu Scarabotto (2018) a corrosão filiforme ocorre sobre superfícies metálicas com revestimentos orgânicos e expostas a ambientes úmidos formando finos filamentos que se propagam em diferentes direções. O aumento de corrosão filiforme é estimulado pela presença de íons Cl^- , brometo (Br^-), sulfato (SO_4^{2-}), carbonato (CO_3^{2-}) e nitrato (NO_3^-). Acontece sobre superfícies metálicas revestidas com películas orgânicas como pintura e expostas a alta umidade.

2.2.5 Corrosão sob tensão

Este tipo de corrosão está associado a esforços mecânicos e é um fenômeno que produz um tipo de fratura, que pode se formar sob baixas tensões. Para ocorrer a corrosão sob tensão três condições devem ser satisfeitas simultaneamente: um meio corrosivo, um material submetido a tensões, e tempo suficiente para que ocorra a nucleação e propagação das trincas no material, de acordo com Júnior (2010).

Segundo Codaro (2006) e Júnior (2010) para evitar a formação deste tipo de corrosão é importante ter o controle da composição química da matriz e dos precipitados, pois a formação de corrosão sob tensão geralmente aumenta com o teor de soluto. As ligas que são sensíveis à corrosão sob tensão contêm quantidades apreciáveis de elementos de liga primária, como cobre, magnésio, silício e zinco. Assim, uma das formas de minimizar e proteger o material contra a corrosão sob tensão é através de tratamentos térmicos como as têmperas.

2.3 Tratamentos mecânicos de superfície

Conforme Brochado (2016) o tratamento superficial mecânico do alumínio é uma etapa importante para obtenção de uma superfície lisa e de boa aparência, que é desejável em muitas aplicações como na indústria bélica. Quando este processo não ocorre de forma completa ou uniforme, pode aparecer defeitos que comprometem a qualidade das peças e equipamentos. A preparação da superfície, através da ação mecânica, para processos posteriores tem como objetivo:

- Eliminação de riscos ou deformações que podem surgir por batidas durante o manuseio antes ou gerados no processo, reduzir a rugosidade da superfície através do polimento da liga.
- Produção de texturas na superfície da peça que, numa etapa posterior, pode ser anodizada.

2.3.1 Polimento

Ainda segundo Brochado (2016) o polimento mecânico tem o objetivo de melhorar a aparência do material e ajustar imperfeições na superfície da peça como: rebarbas, redução da rugosidade, imperfeições e sujidades. Para realizar a operação utiliza-se lixas com diferentes granulometrias, dependendo do material e do acabamento desejado. O processo é realizado em várias etapas, utilizando lixas com granulometrias decrescentes para que ocorra a remoção do material de forma controlada, além disso é necessário aplicar uma determinada pressão e velocidade do abrasivo sobre a peça de trabalho.

2.3.2 *Abrasivos*

É um material com elevada dureza e resistência que, mesmo em formato de grãos, apresenta-se na forma de inúmeras lâminas afiadas. Dependendo do acabamento superficial requerido, há vários tipos de abrasivos que podem ser utilizados, os principais tipos são: areia, alumina, vidro, aço e carboneto de silício, segundo Brochado (2016).

2.3.3 *Jateamento*

Ainda segundo Brochado (2016), o jateamento consiste na projeção de partículas abrasivas sobre a peça e tem como objetivo suavizar arestas, através de um acabamento fosco, preparando a superfície para processos posteriores como a oxidação anódica. A combinação do processo de jateamento e polimento seguido de um processo de anodização, pode produzir ótimos acabamentos nas peças metálicas.

2.4 **Tratamentos químicos de superfícies**

Conforme Scarabotto (2018) os tratamentos superficiais, particularmente conhecidos como tratamentos de conversão para alguns metais como o alumínio, têm o objetivo de aumentar a durabilidade do metal pela formação de um filme de barreira mais espesso em sua superfície capaz de minimizar os efeitos da corrosão. São realizados através de reações químicas e eletroquímicas em um meio oxidante, onde parte do metal transforma-se em um filme de óxido contínuo e protetor. Os métodos de tratamentos de superfície utilizados devem ser aplicados de acordo com as características físico-químicas de cada material. Os revestimentos nos quais o princípio básico da proteção é impedir o contato do meio corrosivo com o material que se deseja proteger são muito empregados nos mais diversos segmentos industriais. Alguns processos de revestimento bastante utilizados são: anodização, eletrodeposição, cromatização, tratamento nanocerâmico, fosfatização e o sistema de pintura.

2.4.1 *Anodização*

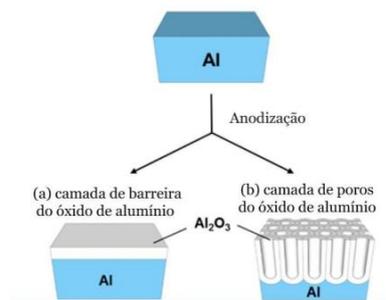
A anodização é um processo eletroquímico que tem como objetivo melhorar algumas propriedades das ligas de alumínio como: dureza, resistência ao desgaste e resistência à corrosão, segundo Pinheiro (2019). Conforme Regone (2004), a anodização é um processo de conversão da superfície do alumínio e suas ligas em óxido de alumínio. O processo de anodização, industrialmente, é usado para obtenção de melhorias do material como:

- Aumentar a resistência à corrosão.
- Melhorar a aparência decorativa.
- Aumentar a resistência à abrasão (anodização dura).
- Aumentar a aderência à pintura.

O processo de anodização no alumínio possibilita a formação de duas subcamadas de óxido, denominadas de camada barreira e camada porosa. O tipo de óxido a ser formado sobre a superfície do alumínio ou da liga, se é tipo barreira e/ou porosa, depende de alguns de fatores e, principalmente, da natureza do eletrólito. A camada barreira é composta por um

filme de óxido denso e fino que se forma sobre a superfície do metal ou substrato, tendo uma espessura que varia de 10 a 40 nm. A camada porosa apresenta estrutura dupla, composta por uma camada pequena de barreira, na parte mais interna e uma camada porosa e grande na parte externa. A camada porosa forma-se quando o filme de óxido é levemente solúvel e sua espessura depende da diferença de tensão utilizada no processo, e da agressividade do eletrólito, segundo Pinheiro (2019) e Regone (2004). A Figura 2 apresenta os dois tipos de óxidos formados no processo de anodização do alumínio.

Figura 2: Esquema que mostra os dois diferentes tipos de óxidos formados no processo de anodização: tipo barreira (a) e tipo poroso (b)

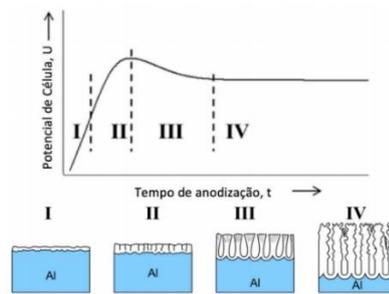


Segundo Pinheiro (2019) enquanto a camada de barreira serve para evitar o contato direto com o meio agressivo, oferecendo uma proteção contra corrosão, a camada porosa atua como uma base para adesão de tintas, coloração decorativa, por exemplo. A temperatura controla a formação de ambas as camadas, mas a diferença de tensão aplicada atua diretamente na camada de barreira. Em contrapartida a densidade de corrente e tempo determinam a espessura da camada porosa.

De acordo com Dick (2017) a anodização com eletrólito sulfúrico e corrente contínua é o processo mais utilizado dentre os diferentes métodos de aplicação na indústria, este método é chamado de galvanostático e pode ser dividido em quatro etapas conforme está representado na Figura 3:

- I. Formação da camada de barreira.
- II. Início da nucleação dos primeiros poros, nesta etapa o potencial de célula desvia da linearidade.
- III. Estabilidade da estrutura de poros, formação de uma camada porosa com uma fina camada barreira no fundo da superfície, esta formação estabiliza o potencial da célula.
- IV. Crescimento da camada porosa, potencial da célula permanece constante devido à resistência da camada barreira.

Figura 3: Representação da mudança de potencial da célula em um processo de anodização galvanostático e a estrutura do óxido em cada fase

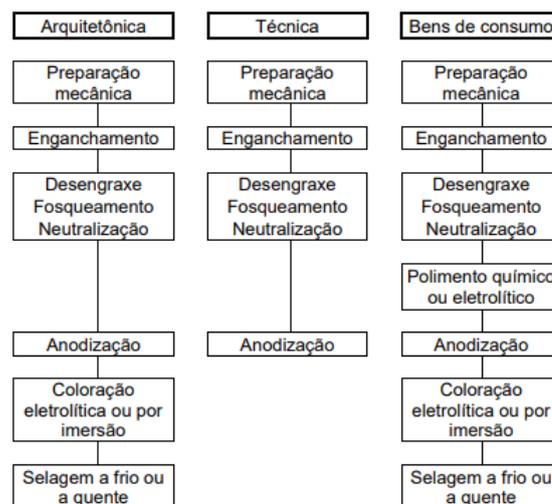


Fonte: Dick (2017)

Segundo Brochado (2016) existem três principais tipos de anodização, a crômica em que o eletrólito é o cromo, a anodização sulfúrica onde o eletrólito é o H_2SO_4 e a anodização dura que utiliza o mesmo eletrólito da sulfúrica, porém o processo é realizado em temperaturas mais baixas. A célula do processo de anodização deve conter uma solução de água e um ácido, como por exemplo o sulfúrico (H_2SO_4), pois apresenta ótima relação de custo e desempenho. No ânodo, polo positivo, conecta-se a peça a ser anodizada, e no cátodo, polo negativo, conecta-se um eletrodo inerte que possa resistir ao ataque ácido.

De acordo com Trujillo (2015) o ácido sulfúrico pode ser utilizado em várias concentrações, e se controlam outros parâmetros do processo tais como a temperatura, voltagem e densidade de corrente para se obter a camada anodizada desejada. O processo de anodização é composto por uma série de etapas, comuns a todos os tipos de anodização e estão descritas na Figura 4.

Figura 4: Fluxograma das etapas do processo de anodização



Fonte: Trujillo (2015)

Conforme Brochado (2016) o controle rigoroso das variáveis do processo é que garante um bom acabamento da peça a ser produzida, alguns fatores afetam diretamente o resultado do processo de anodização do alumínio:

- Ligas de alumínio: O processo de fabricação das ligas de alumínio tem forte relação com a qualidade final da peça. As ligas fundidas são mais suscetíveis a formação de porosidade, desde que a composição da liga esteja dentro dos limites de especificação descritos.
- Concentração do eletrólito: A função do eletrólito é dissolver seletivamente o óxido de alumínio para a formação dos poros, porém a concentração não pode ser muito elevada para evitar dissolução total do filme anódico. A resistência à corrosão é melhor em processos que utilizam o ácido sulfúrico como eletrólito.
- Temperatura: A temperatura deve ser controlada, pois é um dos fatores que mais influenciam nas propriedades do filme anódico. De acordo com Da Silveira (2018) temperaturas mais baixas proporcionam maior dureza, camadas mais compactas, mas requerem tensão mais alta, porém temperaturas mais elevadas produzem camadas mais fáceis de colorir, e com baixa resistência à abrasão.
- Tempo: O tempo tem relação direta com a formação do filme anódico, ou seja, quanto maior o tempo, maior é a camada formada do óxido de alumínio. Deve-se tomar cuidado com tempos superiores ao necessário, pois pode ocorrer dissolução do óxido de alumínio devido à exposição excessiva ao eletrólito, tornando-o mais poroso e heterogêneo. Conforme definiu Da Silveira (2018) o tempo é determinado de acordo com a espessura desejada e pode ser descrito segundo a Equação 2.1.

$$t = \mu / (0,3 * d) \quad (2.1)$$

Onde:

t=tempo em minutos;

μ =espessura do filme anódico em micrômetros;

d=densidade de corrente em A/dm².

- Agitação do banho e impurezas: O processo de dissolução do alumínio é exotérmico e libera calor, por isso a agitação é uma variável importante, pois garante a retirada de calor da superfície da peça. As impurezas afetam a composição química do filme anódico.
- Intensidade de corrente: A intensidade da corrente afeta a espessura do filme anódico. A formação de um óxido de alumínio mais poroso, macio e claro é evidenciado em baixas densidades de corrente.

2.5 Etapas do processo de anodização

A seguir são descritos os tratamentos químicos realizados no processo de anodização, como foi apresentado anteriormente na Figura 4.

2.5.1 Desengraxante/lavagem

O desengraxe é uma etapa inicial de preparação de superfície para que ocorra a remoção de resíduos de óleos, graxas e outros lubrificantes. Quando há resquícios de algum destes contaminantes o processo de anodização é prejudicado, pois impede a passagem de corrente

para a superfície do metal, e um dos defeitos que podem ocorrer é surgimento de manchas na coloração da superfície. Uma sequência de solventes orgânicos e solventes alcalinos são usados para garantir um desengraxe eficiente, conforme Da Silveira (2018) e Trujillo (2015).

De acordo com Da Silveira (2018) alguns dos problemas de limpeza são relacionados a banhos saturados com óleos. Um dos problemas mais frequente está relacionado às graxas, pois se tornam mais sólidas com o tempo, portanto o processo de desengraxe neste tipo de resíduo deve ser realizado rapidamente, e o processo de limpeza deve ser realizado em banhos aquecidos, agitação mecânica ou agitação por ultrassom, segundo Trujillo (2015).

Ainda segundo Trujillo (2015) as etapas de lavagem são realizadas para evitar que resíduos das etapas anteriores possam ser levados para as etapas posteriores. Para prevenir o aparecimento de manchas qualquer mudança brusca de natureza química deve ser evitada.

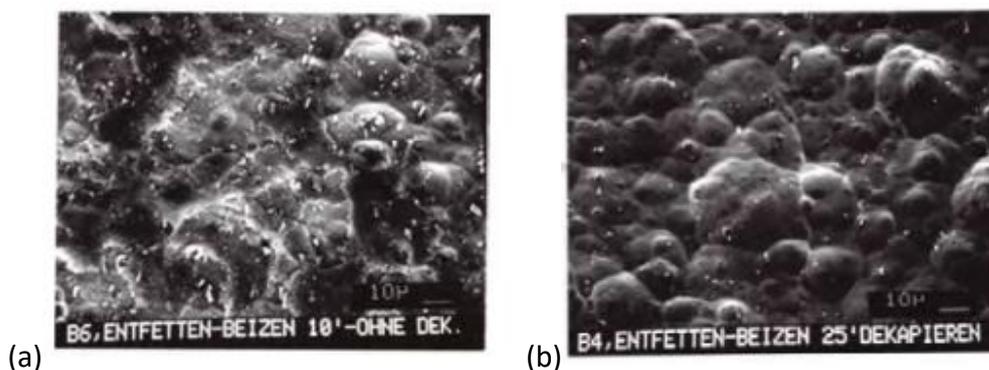
Conforme Da Silveira (2018) o acabamento anodizado pode apresentar defeitos do tipo manchas que geralmente são oriundas dos processos anteriores, como manchas produzidas em tratamentos térmicos, pela ação de produtos corrosivos e pela presença de óxidos formados no processo de extrusão. Para minimizar estes problemas é usual se fazer uma lavagem ácida.

2.5.2 Fosqueamento e neutralização

O fosqueamento é um processo de limpeza que pode ser realizado em meio ácido ou alcalino. Neste processo se produz um acabamento acetinado na superfície do alumínio e tem como objetivo remover a camada superficial de óxidos de alumínio e eliminar as imperfeições provenientes dos processos de conformação e extrusão, de acordo com Da Silveira (2018) e Trujillo (2015).

Ainda segundo Da Silveira (2018) e Trujillo (2015) A neutralização tem como objetivo remover quaisquer resíduos alcalinos presentes na superfície da peça e a dissolução de compostos e hidróxidos formados. É importante manter a concentração de ácido para obter-se bons resultados e uma boa agitação do sistema com ar torna a remoção dos contaminantes mais efetiva. A Figura 5 mostra respectivamente a diferença entre a superfície do material sem o processo de neutralização (a) e com o processo de neutralização (b).

Figura 5: Superfície sem o processo de neutralização, apresenta resíduos alcalinos (a). Superfície neutralizada e isenta de álcalis (b)



Fonte: Da Silveira (2018)

2.5.3 Coloração

Segundo Trujillo (2015) a coloração é obtida pela imersão do material em um banho que contém corantes para a incorporação destes pigmentos na camada porosa de óxido. A fixação da cor pode se dar através da coloração integral, adsorção de corantes, coloração eletrolítica e interferência. Conforme Da Silveira (2018) o filme anódico é altamente poroso e polar e por apresentar um alto poder de absorção é capaz de absorver grandes quantidades de solutos de tipos diferentes. A coloração é controlada pela profundidade de penetração do corante nos poros do filme.

Ainda segundo Da Silveira (2018) uma coloração mais uniforme pode ser obtida em tempos maiores de imersão, sendo que a velocidade de tingimento acontece de forma rápida nos primeiros minutos e torna-se mais lenta com o aumento do tempo de imersão.

2.5.4 Selagem

Segundo Trujillo (2015) a camada anódica, após o processo de coloração, ainda é muito absorvente e pode ser manchada facilmente pelo manuseio do material ou incorporação de contaminantes. Para evitar isto, se faz a selagem da camada porosa que consiste na transformação do óxido de alumínio amorfo em uma forma hidratada do óxido, conhecida como boemita.

Conforme Da Silveira (2018) e Trujillo (2015) após a selagem, o óxido hidratado apresenta um maior volume e é mais resistente a passagem de corrente. A transformação do óxido amorfo ocorre pela difusão de íons hidroxila através da camada anódica o que se observa as seguintes condições: a taxa de selagem diminui progressivamente com o tempo de selagem, a reação de formação da boemita é mais rápida próxima à superfície.

2.6 Análises

2.6.1 Metalografia

Segundo Macedo (2012) e Rohde (2010) a metalografia tem por finalidade estudar a microestrutura dos metais e ligas metálicas, sua relação com a composição química e as propriedades físicas e mecânicas. O ensaio metalográfico relaciona a estrutura interna do material com as propriedades físicas, o processo de fabricação e o desempenho destes materiais. Estes ensaios são de dois tipos: Macrográficos e micrográficos.

2.6.2 Fluorescência de Raio X

Conforme Farinha (2020) e Santos et al. (2013) esta técnica constitui um sistema de espectrometria que tem como base a detecção de radiação X emitida a partir dos átomos excitados e permite determinar elementos químicos de forma rápida, sem destruir a matriz e com baixo custo operacional. Os raios X incidentes excitam os átomos constituintes da amostra, que por sua vez emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração.

2.6.3 *Microscopia eletrônica de varredura*

Segundo Dedavid et al. (2007) a técnica de microscopia eletrônica é utilizada para estudar a morfologia da superfície de uma amostra utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV). A incidência dos elétrons na amostra faz com que os elementos nela presentes emitam elétrons, raios X e fótons os quais podem ser detectados pelo equipamento e, finalmente, traduzidos em sinal de vídeo.

2.7 Defeitos encontrados no processo de anodização

Conforme Trujillo (2015) o controle do tamanho de grão da peça extrudada é importante quando o perfil passar por processo de anodização, pois podem ocorrer o defeito do tipo manchas em peças de alumínio anodizadas.

Ainda segundo Trujillo (2015) durante o processo de desengraxe das peças podem ficar resíduos aderidos à superfície e desta forma pode alterar o processo de anodização, impedindo a passagem de corrente e prejudicando a formação da camada anódica. A espessura da camada fica irregular diminuindo sua capacidade de proteção, podendo gerar manchas.

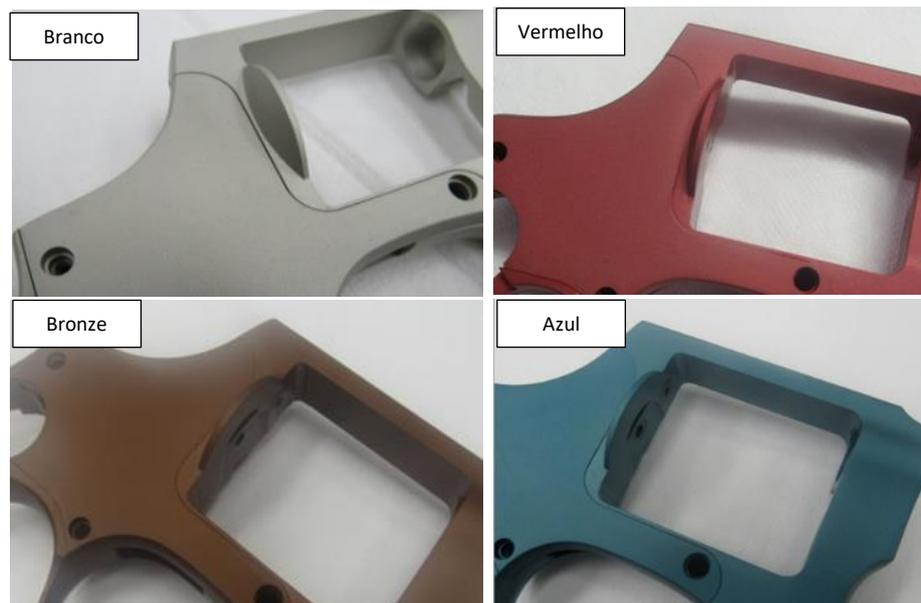
Segundo Meneghesso (2008) dentre os defeitos superficiais existente alguns podem ser revelados no processo de anodização. Abaixo são apresentados alguns dos defeitos da matéria prima, suas causas, como reconhecê-los e corrigi-los.

- Contaminação com outras ligas: Este defeito é mais comum em perfis tubulares e é causado por contaminação do recipiente da prensa de extrusão, este problema pode ser amenizado pela limpeza do recipiente da prensa.
- Faixas de constituintes: É mais comum em componentes extrudados e pode estar relacionado com a presença do constituinte $FeAl_6$ em forma segregada. Este defeito pode ser corrigido controlando a presença de ferro.
- Faixas de segregação (Wood Grain): Nos produtos extrudados aparecem na forma de nó de madeira, com largura uniforme ao longo deles, ocorre pelo ataque alcalino preferencial de camadas superficiais e para minimizar o defeito é necessário atenção às práticas de refusão, extrusão e laminação.
- Formas de estruturas alinhadas (grãos grosseiros): Formação de bandas de grãos de diferentes tamanhos, causadas por deficiência no processo de homogeneização ou no processo de extrusão.

3 Materiais e Métodos

O material utilizado neste estudo é uma liga de alumínio 7075 (5,6% Zn, 2,5% Mg, 1,6% Cu e 0,30% Cr) que foi submetido a uma têmpera T6 (solubilização e envelhecimento artificial) e, posteriormente, foi anodizado e submetido ao processo de coloração com corantes nas cores vermelha, bronze, azul e branca, conforme a Figura 6.

Figura 6: Tipos de acabamentos anodizados



Fonte: Autor/2021

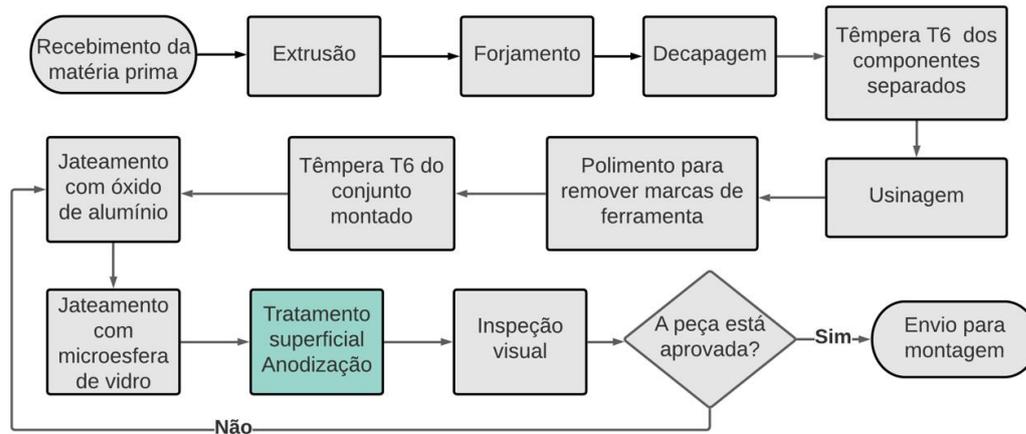
Após o processo de fabricação das peças, através da anodização e coloração, estes componentes apresentaram manchas de diversos tipos e formatos. Como as peças precisam estar isentas de defeitos visuais para garantia da qualidade do produto acabado, elas foram reprovadas pelo controle da qualidade o que ocasiona retrabalho ou descarte deste material. Portanto, torna-se necessário analisar e identificar as prováveis causas destes defeitos ou falhas, para reduzir os custos da produção.

3.1 Fluxograma do processo

O processo de fabricação das peças na linha de produção segue as seguintes etapas: conformação mecânica, tratamento térmico, usinagem, polimento e finalmente o tratamento superficial de anodização convencional. Os processos de extrusão, forjamento, decapagem e têmpera T6 dos componentes são realizados por fornecedor externo enquanto os processos seguintes são realizados pela empresa na qual foi realizado o presente estudo de caso. A Figura 7 mostra o fluxograma geral do processo de fabricação das peças.

Ao final do processo de anodização é realizada a inspeção visual das peças no qual segue o método de análise baseado em uma distância ótima para inspeção de 30cm, tempo para inspeção de 32 segundos e luminosidade da bancada de inspeção na faixa de 1550 lux (intensidade luminosa por unidade de área) até 1750 lux. Os defeitos encontrados nas peças são identificados e anotados em planilhas diariamente, para alimentar as planilhas eletrônicas e, assim, determinar os indicadores de qualidade.

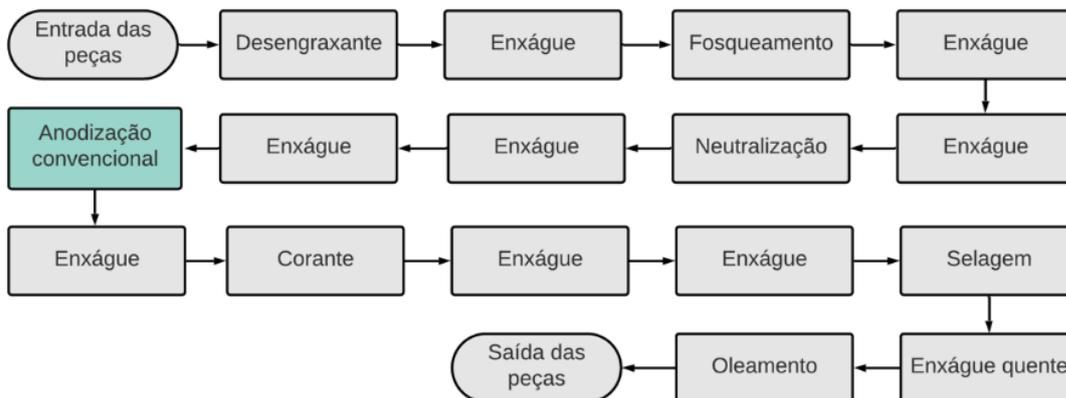
Figura 7: Fluxograma geral do processo de fabricação das peças



Fonte: Autor/2021

Como este estudo avalia as prováveis causas do surgimento de manchas no processo de anodização do alumínio, é importante avaliar a sequência deste processo. A Figura 8 mostra o processo de anodização convencional para peças em alumínio.

Figura 8: Fluxograma do processo de anodização



Fonte: Autor/2021

O processo de anodização é composto por uma série de dezesseis tanques onde as peças são imersas por um determinado período. O processo é automatizado, sendo que o transporte entre os tanques é realizado através de gancheiras, que têm a função de fixar as peças a serem anodizadas e fechar o contato da peça com o circuito elétrico do banho. Desta forma, as gancheiras devem permitir a montagem e a desmontagem das peças de forma simples, possuir uma distribuição simétrica dos pontos de contato da peça com a gancheira, dimensionamento elétrico adequado evitando perdas e consumo excessivo de energia elétrica e garantir que os gases liberados pelas reações químicas do processo possam ser escoados de forma rápida através do posicionamento das peças na gancheira.

Uma bandeja é utilizada na parte inferior da gancheira cada vez que as peças saem de um tanque para o outro para não haver mistura entre os banhos e evitar possíveis contaminações e falhas superficiais. A Figura 9 mostra o processo de anodização em que foi realizado este estudo de caso.

Figura 9: Processo de anodização convencional, gancheira (a), célula anodização (b) e (c)



Fonte: Autor/2021

No processo, os banhos de desengraxe químico, anodização, corante, selagem e enxágue quente requerem um controle de temperatura. Todos os banhos são aquecidos, com exceção dos banhos de anodização, que necessitam de refrigeração, sendo assim, necessário um chiller, trocador de calor e torre de resfriamento para o processo.

3.2 Parâmetros da anodização

A determinação do tempo requerido para a obtenção da espessura desejada do filme de óxido na anodização depende da espessura do filme anódico requerida, que neste processo esteve entre 20 e 30 μ m, e da densidade de corrente.

A partir destes dados as amostras foram retiradas da linha de produção para a realização dos ensaios técnicos. Os corpos de prova receberam um tratamento térmico em t \hat{e} mpera T6 realizado em forno poço, após foram realizados processos de polimento, jateamento com microesferas de vidro e anodização convencional. O processo de anodização convencional seguiu os seguintes parâmetros:

- Desengraxante: O banho de desengraxante contém compostos inorgânicos e agentes tensoativos solubilizados em água, a temperatura de trabalho varia de 55°C a 75°C, e o volume nominal é de 990L.
- Fosqueamento: Na etapa de fosqueamento o banho é alcalino e a temperatura de trabalho varia de 25°C até 30°C, o volume nominal é de 990L.
- Neutralização: O banho de neutralização é composto por ácidos e corantes solubilizados em água, a temperatura de trabalho fica entre 25°C e 30°C e o volume nominal é de 825L.
- Anodização: A composição dos banhos de anodização contém ácido sulfúrico e água, a temperatura de trabalho está em torno de 17°C a 19°C e o volume nominal é de 1157L. Neste banho, conforme a cor da peça o tempo de imersão muda, para peças brancas o tempo é de 10 minutos, peças coloridas é de 40 minutos e peças pretas é de 60 minutos. A corrente aplicada no banho também muda de acordo com a coloração da peça.
- Selagem: Por fim na etapa de selagem o banho contém acetato de níquel e derivados aromáticos sulfonados de caráter aniônico, ácido benzoico e água, a

temperatura de trabalho está em torno de 90°C e 100°C e o volume nominal do banho é 990L.

3.3 Estudo de caso

O presente trabalho se iniciou com uma pesquisa dos problemas recorrentes na linha de produção da fábrica. Foi realizada acumulação de conhecimento sobre o tema, formulação de hipóteses sobre a causa raiz do problema de manchas nas peças em alumínio com base na observação do objeto de estudo, realização de testes durante o processo, variando algumas etapas e operações realizadas. Também foram realizadas análises para identificar a composição metalográfica das peças, análise de fluorescência de raio X (FRX) para identificar a composição da matéria prima, e observação de amostras ao microscópio eletrônico de varredura (MEV). Por fim os resultados e análises foram comparados com as hipóteses para identificar quais são as possíveis causas potenciais do problema.

3.4 Testes em linha de produção

Após o surgimento do problema de manchas nas peças em alumínio, setores de engenharia, qualidade e manufatura trabalharam em conjunto para levantar dados sobre as prováveis causas do problema. Foram realizados estudos em diversas áreas do processo para identificar quais etapas poderiam ser determinantes para formação das manchas, através de uma análise do fluxograma identificou-se as etapas que poderiam ser mais significativas. Assim, nestas etapas, foram retiradas amostras de peças manchadas da linha de produção para realização de diferentes testes com o objetivo de avaliar se uma determinada etapa do processo poderia estar influenciando na formação das manchas.

Foram realizados teste com a finalidade de reprocessar peças em diferentes fluxos para diminuir o índice de sucata gerada e identificar se uma das etapas poderia ser mais significativa para a formação das manchas. Testes para avaliar os diferentes fornecedores e se havia diferença na matéria prima quando comparado com peças que foram processadas nos anos de 2019 e 2020.

Foram realizados outros testes para avaliar se o processamento da peça sem o a etapa de T6 poderia amenizar as manchas. Também foi avaliado o processo de anodização, no qual foi realizado testes em empresa terceirizada para identificar se o processo de anodização desta empresa poderia amenizar a formação das manchas.

3.5 Amostras e análises

3.5.1 Metalografia (macrografia e micrografia)

Para realização das análises metalográficas as amostras seguiram etapas de corte através de discos abrasivos, embutimento do material em resina, lixamento para obter a superfície adequada para a análise e revelação da estrutura através de solução alcalina que foi posteriormente neutralizada com solução ácida.

O ensaio macrográfico examina a matéria prima, após ser polida e atacada por reagente adequado, a olho nu com o auxílio de uma lupa ou microscópios estéreos com aumentos que variam de 5x até 50x ou 64x. Este ensaio permite analisar o aspecto da superfície como um todo, através desta análise é possível identificar a homogeneidade do material, a distribuição

e natureza das falhas, impurezas e o processo de fabricação e profundidade de tratamento térmico. As amostras de peças manchadas foram enviadas para o fornecedor que realiza o processo de extrusão no alumínio e assim foi possível observar a matéria prima utilizando um estereoscópio microscópio óptico com ampliações de 6 a 30x.

A micrografia utiliza microscópio para a análise e permite observar as fases presentes no material, a granulação (tamanho de grão), teor de carbono no aço, natureza do material, a distribuição e forma do que constitui a matéria, e algumas inclusões. Para observação das amostras utilizou-se o microscópio ótico com ampliação de 200 a 500x e a aquisição de imagens digitais foi realizada através da câmera com auxílio de um software de imagens.

3.5.2 *Fluorescência de Raio X*

Para realização da análise foi realizado ensaio de fluorescência de raio X semiquantitativa em duas peças de alumínio com diferentes formatos, ambas as peças do mesmo fornecedor de alumínio e forjadas no mesmo lugar. Para a realização deste teste as amostras foram lixadas para remover a cobertura com pigmentação antes da leitura direta, o equipamento utilizado foi cedido pelo Instituto Tecnológico de Micropaleontologia que pertence a Universidade vale do rio dos sinos (Unisinos).

3.5.3 *Microscopia eletrônica de varredura*

Peças sem mancha e manchadas, ambas as peças de mesmo formato e coloração foram separadas para a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). O teste foi realizado em equipamento cedido pelo Instituto Tecnológico de Micropaleontologia, a amostra foi limpa com álcool isopropílico e analisada diretamente no microscópio eletrônico de varredura em alto vácuo, utilizando detectores EBSD (Electron Backscatter Diffraction) para imagens e EDS (Espectroscopia de raios X por dispersão em energia) para microanálise química.

Uma segunda análise foi realizada no fornecedor no qual produz o forjado em alumínio, uma amostra de peça manchada foi enviada e então foi realizada a análise de MEV, com temperatura de trabalho de 21°C.

3.5.4 *Estudo e verificação da temperatura do forno de têmpera*

O processo de têmpera T6 é realizado duas vezes em diferentes etapas durante o processo, a primeira etapa é realizada por fornecedor externo e acontece após o processo de forjamento, a segunda etapa ocorre após o processo de usinagem final em um forno poço com aquecimento elétrico e ventilação forçada na parte inferior, tampa com abertura manual e comando de potência por contadora.

No primeiro processo de têmpera T6 que é realizado por fornecedor externo foram realizados estudos para avaliar o controle de temperatura através de análises gráficas de temperatura X tempo de solubilização e de temperatura X tempo de precipitação.

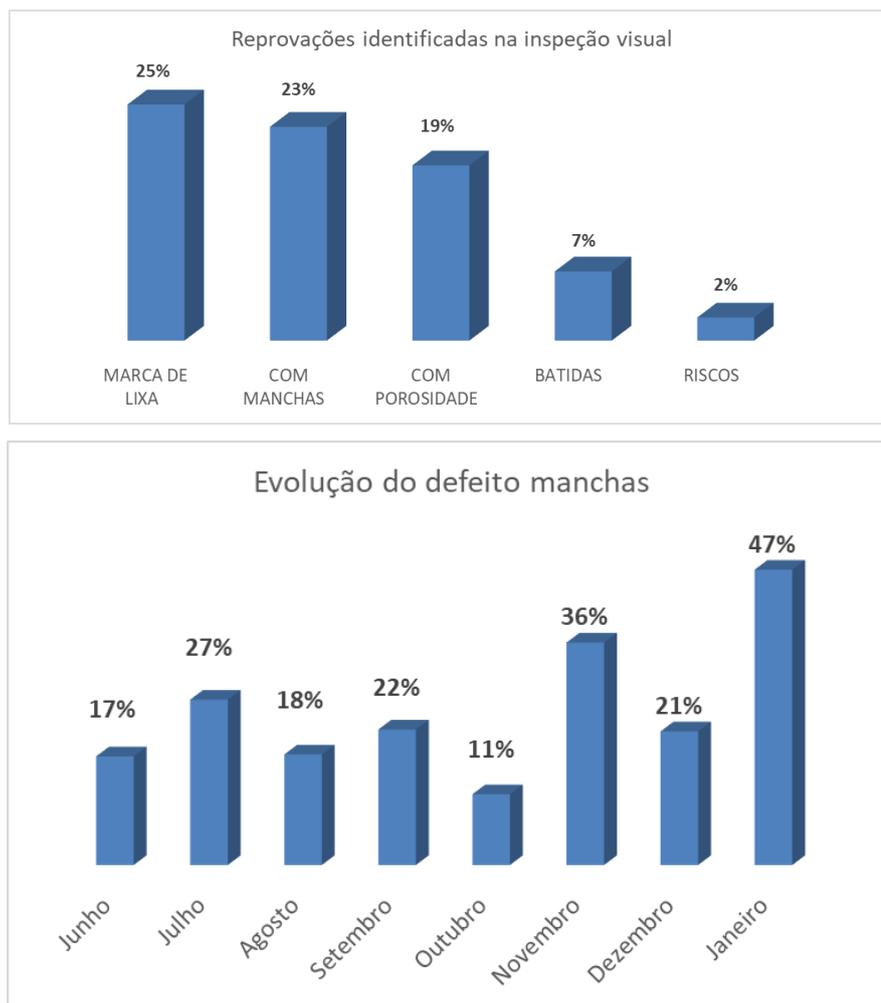
Para a realização do mapeamento das temperaturas dos fornos do segundo processo de têmpera T6 que ocorre internamente na empresa foi utilizada uma maleta de monitoramento de temperatura e registro de dados, e um termopar.

4 Estudo de Caso

Este estudo avaliou o processo de anodização como tratamento de superfície em ligas de alumínio 7075, solubilizada e envelhecida artificialmente (T6). O processo de anodização, propicia uma série de melhorias nos materiais tratados, porém é recorrente o surgimento de alguns problemas que se verificam após a conclusão deste processo, como é o caso das manchas na camada de óxido.

O defeito mancha começou a ser mais significativo após o mês de setembro de 2020, neste período iniciou-se um estudo das prováveis causas, no processo de anodização e nas etapas anteriores a este processo, visando encontrar as prováveis fontes geradoras deste problema. Ao mesmo tempo foram analisados os processos de fornecedores externos e realizadas análises em laboratórios credenciados. A Figura 10 mostra as reprovações identificadas na inspeção visual e a evolução das reprovações por manchas entre os meses de setembro de 2020 a janeiro de 2021.

Figura 10: Evolução do defeito mancha de peças em alumínio

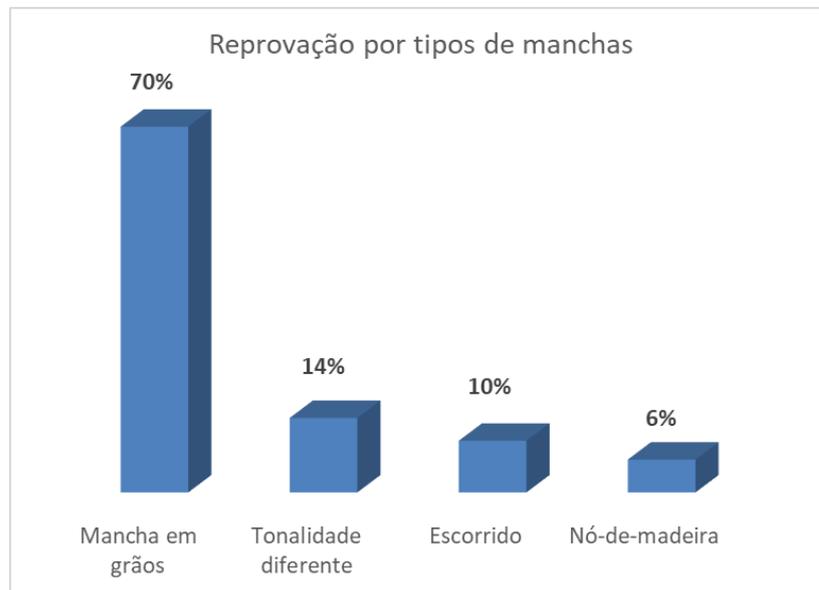


Fonte: Autor/2021

Estas manchas foram classificadas pelos tipos e formatos como apareceram nas peças, tendo como base o artigo técnico que faz a classificação de manchas, Meneghesso (2008),

revelados no processo de anodização. A Figura 11 mostra os diferentes tipos de manchas e a porcentagem de reprovação de cada tipo, no mês de fevereiro de 2021.

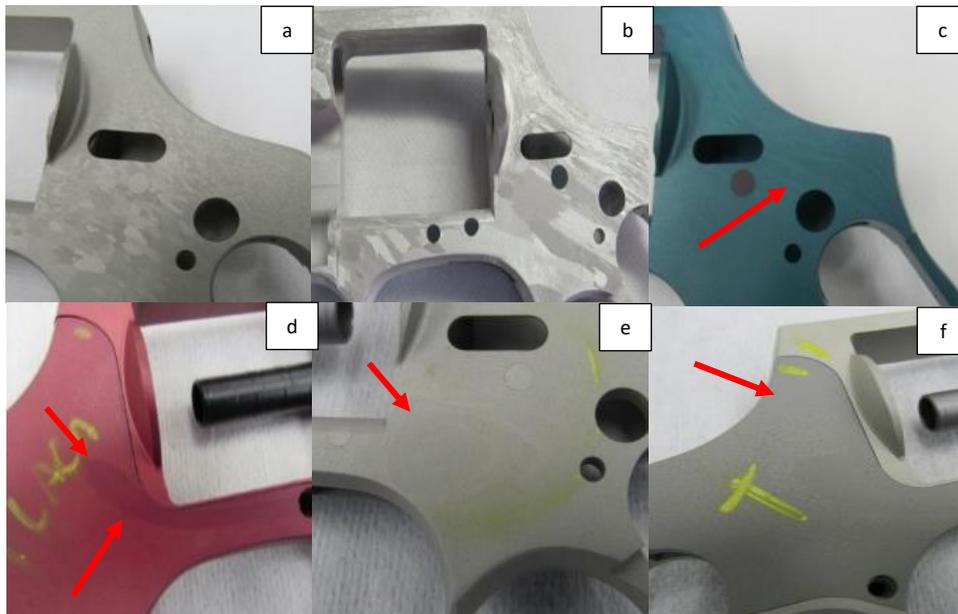
Figura 11: Pareto dos tipos de manchas nas peças em alumínio, fevereiro 2021



Fonte: Autor/2021

A Figura 12 representa os tipos de manchas que foram analisados neste estudo. Em (a), (b) e (c) está representada a mancha tipo “grãos”, pois aparentemente é possível identificar bandas de grãos na peça com diferentes formas e tonalidades, em (d) é representado a mancha tipo “escorrido”, pois forma manchas no sentido longitudinal da peças semelhante a uma tinta escorrida em uma superfície, em (e) é possível identificar a mancha tipo “nó de madeira”, onde aparecem pequenos redemoinhos centralizados em um ponto, este nome foi dado, pois o formato da mancha é semelhante a um nó de madeira. Por fim em (f) é representada a mancha tipo “tonalidade diferente”, pois somente uma parte da peça apresenta tonalidade diferente do resto.

Figura 12: Diferentes tipos de manchas em peças anodizadas. Grãos (a), (b) e (c), *escorrido* (d), *nó de madeira* (e) e *tonalidade* (f)



Fonte: Autor/2021

As peças em questão foram retrabalhadas na tentativa de eliminar os defeitos das manchas, porém como as manchas persistiram, todas as peças foram descartadas. O valor em sucata entre os meses de outubro de 2020 a março de 2021 ficou em torno de R\$600,00 mil reais. Portanto os esforços e as pesquisas realizadas para descobrir as causas deste problema impactam na redução do custo de produção para estas peças e conseqüentemente no produto acabado.

Além das características funcionais, estas peças também são decorativas, logo a qualidade e uniformidade da coloração é de suma importância para este fim. Assim, é necessário analisar e identificar as prováveis causas das manchas.

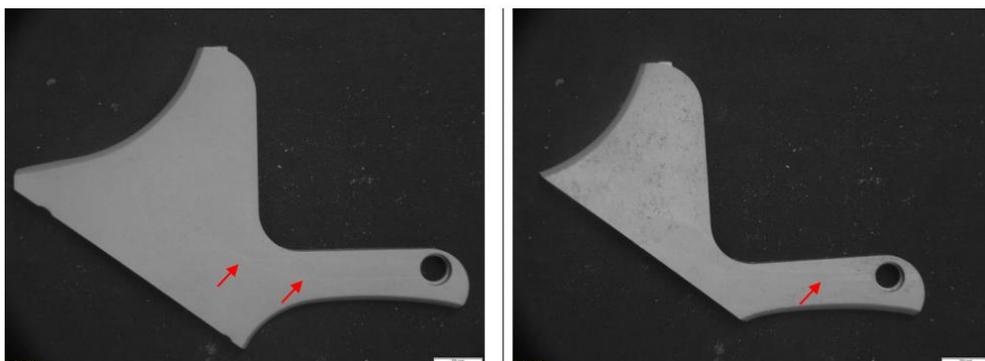
5 Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises e dos testes apresentados no capítulo anterior. Estas análises e testes em linha de produção foram realizadas na empresa em que este estudo foi realizado a fim de organizar uma investigação do problema das manchas nas peças de alumínio da liga 7075-T6. Assim, este estudo de caso busca a identificação de prováveis causas de falha a partir dos resultados das análises e testes que foram feitos.

5.1 Análises metalográficas

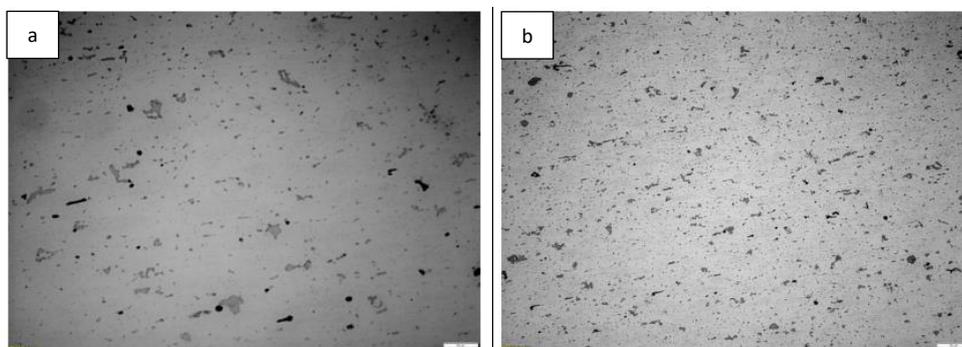
Para esta primeira análise foram separados corpos de prova que apresentavam manchas do tipo “escorrido” e a seguir estas peças foram enviadas para o fornecedor de alumínio, que realiza o processo de extrusão para que realizasse as análises metalográficas. As análises de macrografia e micrografia das amostras apresentaram uma leve diferença de estrutura devido ao fluxo do metal (final de extrusão) apresentando fases mais grosseiras na região da mancha. A Figura 13 mostra a macrografia e a Figura 14 mostra a micrografia na região com fluxo de final de extrusão.

Figura 13: Macrografia na região com fluxo de final de extrusão



Fonte: Laboratório do fornecedor de alumínio/ Hydro (2021)

Figura 14: Micrografia na região do fluxo de metal (a) e fora da região do fluxo de metal (b)



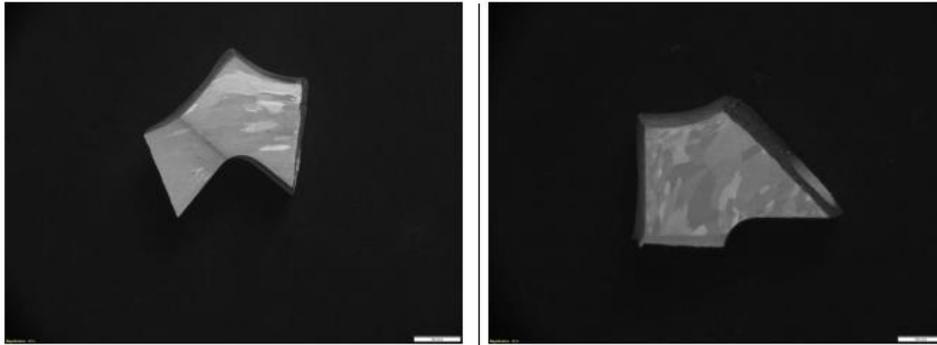
Fonte: Laboratório do fornecedor de alumínio/ Hydro (2021)

A partir dos resultados das análises de macrografia e micrografia, onde há a possibilidade de alinhamento de fases de maior tamanho devido ao fluxo, pode haver regiões de

composições heterogêneas dentro da estrutura cristalina do material e, posteriormente, revelada na camada de óxido.

Para realização de uma segunda análise metalográfica, foram separados corpos de prova que apresentavam manchas do tipo “grãos”. Para esta análise foram realizadas apenas macrografias de uma peça. As amostras apresentaram granulação grosseira em sua estrutura, com tamanho de grão médio ASTM de $3000\mu\text{m}$, conforme Figura 15.

Figura 15: Granulação grosseira na amostra

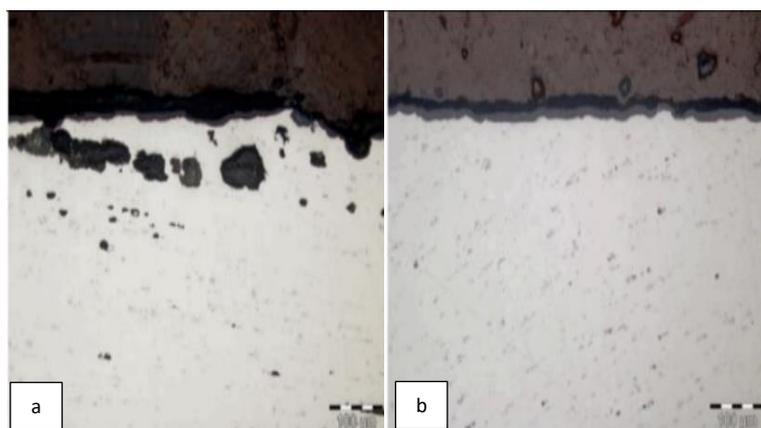


Fonte: Laboratório do fornecedor de alumínio/ Hydro (2021)

Baseado nos resultados das análises realizadas pelo laboratório, pode se inferir que as manchas poderiam estar relacionadas com a composição das fases presentes em cada grão ou regiões com granulação similar presente no metal base. Geralmente esta estrutura de maior granulometria pode ter sido originada no tratamento térmico. Outros estudos já haviam indicado a hipótese das possíveis causas das peças manchadas estarem associadas ao aquecimento excessivo durante o processo de extrusão ocasionando uma distorção na composição da liga, ou seja, excesso de silício ou magnésio dificultam a extrusão, fazendo com que o aquecimento decorrente da deformação da matéria prima seja superior ao esperado, Trujillo (2015).

Outro teste realizado em um corpo de prova, de uma peça na cor azul que apresentava a mancha do tipo “grãos” foi enviada a outro laboratório para análise metalográfica, na região com manchas e sem manchas. Na micrografia se verificou a ocorrência de porosidades na região com mancha (a), e na região (b), da mesma amostra sem manchas, não foram evidenciadas porosidades conforme a Figura 16.

Figura 16: Micrografia de amostra com mancha (a) e sem mancha (b)



Fonte: SGS do Brasil Ltda/ SGSGROUP (2021)

Baseado neste fato pode-se inferir que o surgimento de manchas nas peças poderia estar relacionado à rugosidade superficial do material e/ou associada a regiões com maior densidade de poros da camada de óxido formada na anodização.

5.2 Análises de fluorescência de raio X

Esta análise semiquantitativa comparou os resultados dos elementos químicos detectados em uma peça sem mancha (com outro formato) com uma peça manchada que é o objeto de estudo deste trabalho, como mostra a Tabela 2. Nesta tabela está representado o resultado do teste de fluorescência de raio X, expresso em % em massa.

Tabela 2: Análise de fluorescência de raio X

Elemento	Peça sem mancha	Peça manchada	Norma
Mg	2,091	2,034	2,10 – 2,90
Al	89,167	90,467	90,00 – 99,00
Si	0,467	0,383	0,4
P	0,026	0,016	0,05 – 0,15
S	0,283	0,012	0,05 – 0,15
Cl	0,022	<0,01	0,05 – 0,15
Ca	0,019	0,024	0,05 – 0,15
Ti	0,054	0,042	0,20
V	0,010	0,008	0,05 – 0,15
Cr	0,198	0,186	0,18 – 0,28
Mn	0,031	0,041	0,3
Fe	0,425	0,404	0,5
Cu	1,650	1,474	1,20 – 2,00
Zn	5,491	4,990	5,10 – 6,10
Ga	<0,01	0,022	0,05 – 0,15
Zr	0,014	0,020	0,05 – 0,15
Nb, Mo, Sn, Tl, Pb	<0,01	<0,01	0,05 – 0,15
Yb	0,028	0,020	0,05 – 0,15

Fonte: Instituto Tecnológico de Micropaleontologia/ Instituto Tecnológico de Micropaleontologia (2021), Alrase (2021).

Uma das hipóteses para realização deste teste é que as peças poderiam ter composições químicas diferentes, e com isso levar a uma diferença de microestrutura na peça.

Como esperado, a matriz da liga é composta majoritariamente por alumínio, com pequena presença dos outros elementos de liga, ou seja, Mg, Mn, Fe, Si e Cu. Quando se compara a composição das ligas dos materiais analisados com a norma é possível identificar que está dentro da faixa aceitável.

O enxofre, provavelmente, é proveniente do ácido sulfúrico usado na anodização e que fica incorporado ao óxido formado. Pelos resultados da análise verificou-se que a quantidade de enxofre é maior na peça sem mancha, e por isto não é relacionado com as manchas, ou seja, o enxofre possivelmente não é o componente que interfere na formação das manchas.

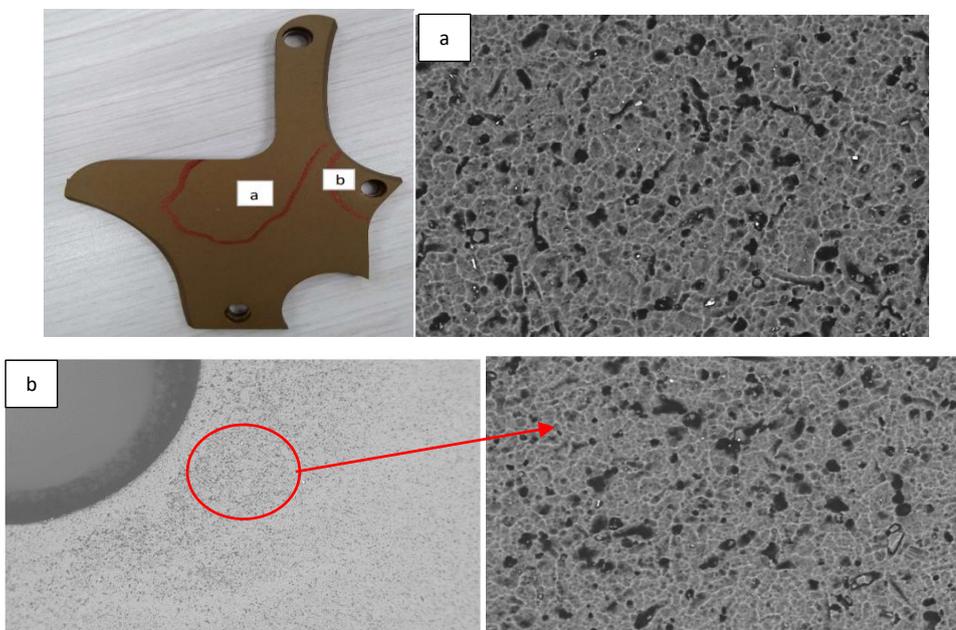
Neste caso a composição da liga tanto para uma peça similar sem manchas quanto para uma peça manchada não apresenta diferença significativa de composição. Pela análise é indicado que provavelmente a composição química da liga não seja um dos motivos da ocorrência das manchas.

5.3 Microscopia eletrônica de varredura

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em duas peças que foram retiradas da linha de produção como amostras de coloração bronze. A primeira amostra estava com uma mancha do tipo “escorrido” e a segunda isenta de manchas.

A Figura 17 mostra o resultado do teste de MEV da amostra sem mancha onde (a) e (b) representam as regiões da amostra escolhidas para análise.

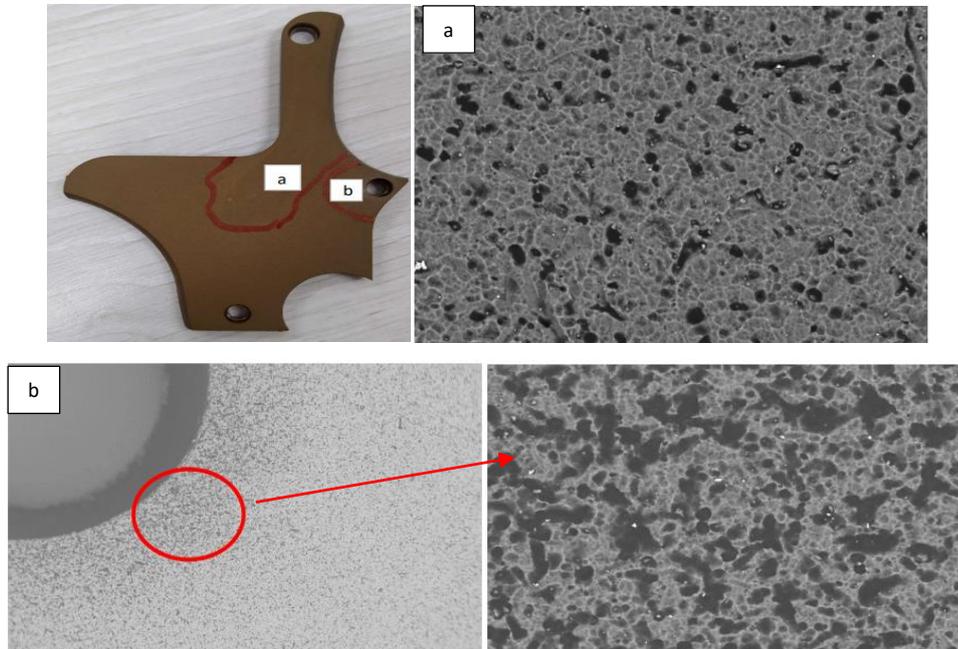
Figura 17: Imagem realizada com MEV e detector EBSD na amostra isenta de manchas



Fonte: Instituto Tecnológico de Micropaleontologia/ Instituto Tecnológico de Micropaleontologia (2021)

Já a Figura 18 apresenta a amostra manchada, onde (a) representa a parte manchada e (b) a região próxima ao furo, mas sem mancha.

Figura 18: Imagem realizada com MEV e detector EBSD na amostra manchada

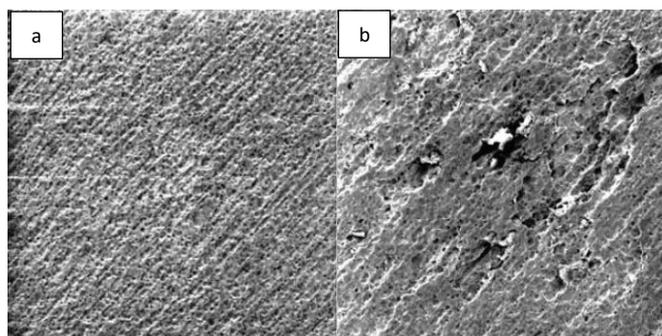


Fonte: Instituto Tecnológico de Micropaleontologia/ Instituto Tecnológico de Micropaleontologia (2021)

Nas imagens mostradas acima se verifica que na região (b) próximo ao furo, houve provavelmente maior solubilização do material base formando uma região com maior densidade de poros, que poderia estar associada à ocorrência de tensões residuais resultantes do processo de fabricação da peça (perfuração).

Para confirmação dos resultados destas análises, foram feitas outras análises de MEV, em outro laboratório. Uma peça com manchas do tipo “grãos” e coloração azul foi separada na linha de produção, identificando as regiões (a) manchada e (b) isenta de manchas. A Figura 19 mostra o resultado desta análise.

Figura 19: Imagem da análise de MEV na região isenta de manchas (a) e na região manchada (b)



Fonte: SGS do Brasil Ltda/ SGSGROUP (2021)

Baseando-se nos resultados das análises realizadas, verificou-se que a parte manchada da peça (b) apresentou maior rugosidade superficial provavelmente decorrente de dissoluções de camadas superficiais.

5.4 Estudo e verificação da temperatura do forno de têmpera

Este estudo teve como objetivo avaliar as temperaturas de três fornos poços onde é realizado o processo de T6, pois conforme resultado do teste de metalografia, as manchas poderiam ser geradas pela granulação grosseira, oriunda de um aumento de temperatura durante o processo e/ou prolongado tempo em alta temperatura. Por isso, o estudo procurou verificar se há possibilidade de os fornos estarem trabalhando com temperatura acima da temperatura indicada para o processo.

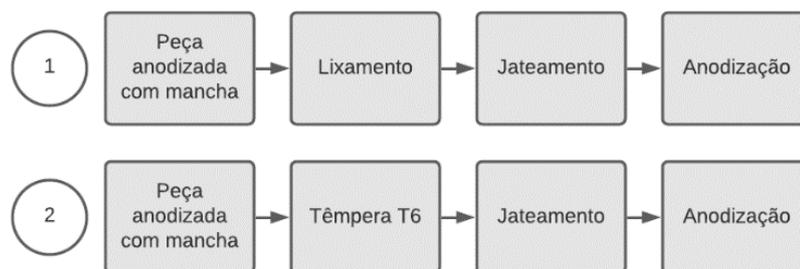
Os resultados destes testes mostraram que a diferença entre as temperaturas ficou dentro da faixa de tolerância de +/- 5°C indicada para o processo. Nenhuma temperatura máxima registrada excedeu a temperatura de controle.

5.5 Testes realizados na linha de produção da empresa

5.5.1 Teste 1: Avaliar o reprocessamento das peças em diferentes fluxos

Este teste foi realizado em dois lotes de 15 peças cada e consistiu em reprocessar as peças já manchadas em dois fluxos distintos para identificar possíveis falhas no processo interno, ou seja, alterar o fluxo de produção para avaliar se as peças iriam manchar novamente ou não. A Figura 20 mostra os fluxos dos testes realizados em peças reprovadas por manchas.

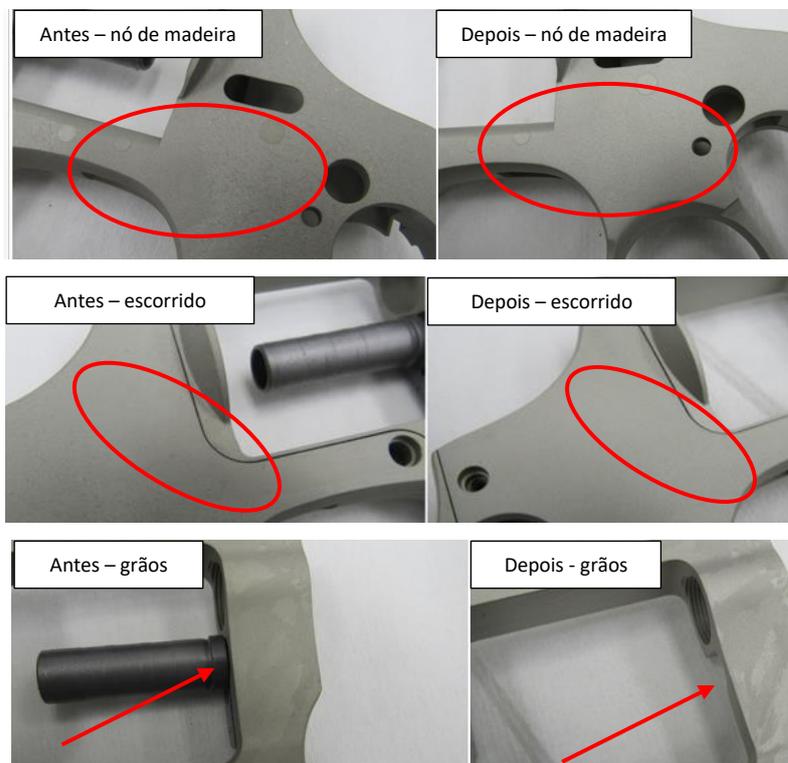
Figura 20: Dois fluxos produtivos diferentes



Fonte: Autor/2021

Como resultado, todas as peças do primeiro fluxo foram reprovadas com a mesma intensidade de mancha. No segundo fluxo, 40% das peças após o retrabalho reduziram e/ou eliminaram as manchas (apenas para manchas mais leves) na forma de “nó de madeira” e “escorrido”. A mancha em formato de “grãos” permaneceu na mesma intensidade. A Figura 21 mostra respectivamente o antes e o depois da mancha do tipo “nó de madeira”, tipo “escorrido” e tipo “grãos”.

Figura 21: Segundo teste: retrabalho das peças no seguinte fluxo: T6, jateamento e anodização



Fonte: Autor/2021

5.5.2 Teste 2: Avaliar peças de diferentes fornecedores

Este teste teve como finalidade comparar peças defeituosas de fornecedores com peças antigas destes mesmos fornecedores que não apresentaram defeitos (processadas entre 2019 e 2020 antes do surgimento do problema). Durante o teste as peças processadas entre 2019 e 2020 foram intercaladas no posicionamento das gancheiras entre fileiras, lados e diferentes posições, e posteriormente foram feitas avaliações dessas peças pela inspeção visual.

Os testes foram realizados com 124 peças nas colorações azul, bronze e vermelho, todas as 9 peças que foram processadas entre 2019 e 2020 do fornecedor A não apresentaram nenhum tipo de mancha, já as 115 peças processadas no ano de 2021 dos fornecedores A e B foram reprovadas por manchas em formato de “grãos”. A Figura 22 mostra as peças reprovadas no teste.

Figura 22: Peças reprovadas, manchas do tipo “grãos”



Fonte: Autor/2021

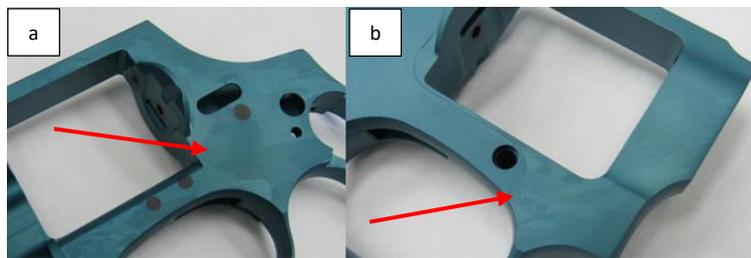
5.5.3 Teste 3: Avaliar o processo de T6

Há possibilidade de as manchas serem oriundas do processo de têmpera T6, pois se sabe que após um tratamento térmico excessivo e/ou prolongado tempo a alta temperatura é possível que, nas etapas posteriores, possam ocasionar manchas.

Para isto foi realizado um teste para avaliar o processo sem a etapa de T6, uma vez que esta é a única etapa que poderia atingir elevadas temperaturas. Para realização deste teste foram separadas dezesseis peças e submetidas às seguintes etapas de processamento: Usinagem, lixamento, jateamento e anodização.

Após a inspeção visual, treze peças foram reprovadas por manchas do tipo “grãos” e apenas três peças foram aprovadas, a Figura 23 mostra a peça reprovada na coloração azul.

Figura 23: Peça reprovada no teste, lado esquerdo (a), lado direito (b)

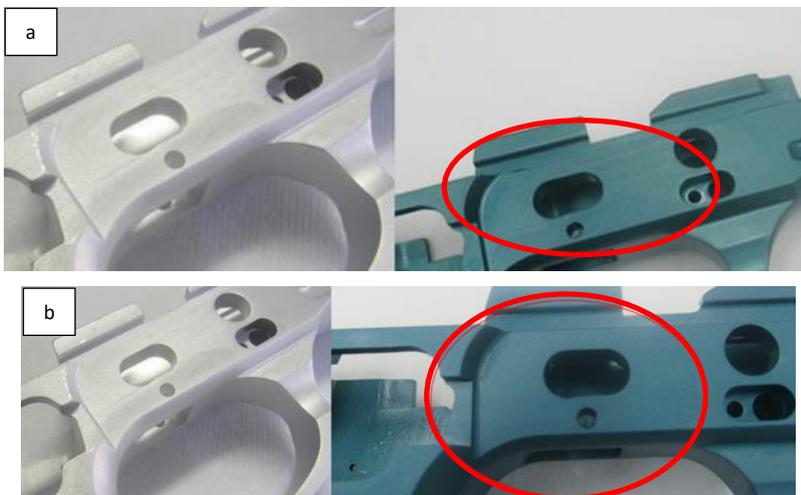


Fonte: Autor/2021

5.5.4 Teste 4: Avaliar peças com diferentes geometrias

Este teste consistiu em avaliar se peças com formatos diferentes entre si, pertencentes ao mesmo fornecedor e forjadas no mesmo local, iriam formar as manchas. As peças seguiram os mesmos parâmetros de banho, sendo uma amostragem jateada e outra não jateada antes do processo de anodização, desta forma é possível avaliar se o processo de jateamento ameniza ou potencializa a formação das manchas, a Figura 24 mostra a peça apenas lixada e anodizada (a), e em (b) a peça lixada, jateada e anodizada.

Figura 24: Peça lixada e anodizada (a) e peça lixada, jateada e anodizada (b)



Fonte: Autor/2021

É possível visualizar que no alumínio bruto os detalhes de estruturas não são visíveis a olho nu, porém após o ataque de revelação da estrutura é possível. Anodizando as peças com e sem jateamento as manchas da revelação da estrutura permanecem. A diferença é que o jateamento torna a mancha um pouco menos visível. A produção desta peça anodizada é na cor preta o que explica o motivo de não surgir as manchas visíveis no processo normal, pois na coloração preta as manchas são menos visíveis.

5.5.5 Teste 5: Avaliar o processo de anodização em empresa terceirizada

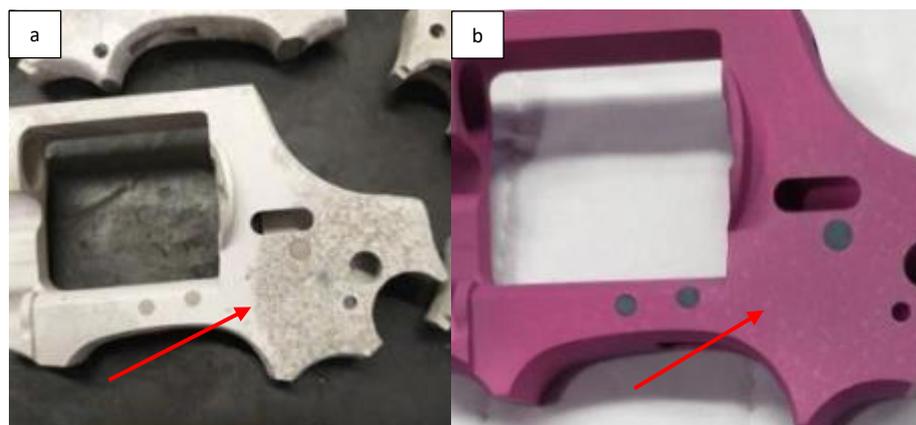
Este teste teve como finalidade a comparação do processo de anodização interno na fábrica com as peças produzidas em uma empresa terceira utilizando os mesmos corantes que o processo de anodização interna para avaliar se as manchas relacionadas ao processamento da matéria prima surgem também no processo de anodização desta empresa terceira.

Foram separados dois lotes de peças para o teste, vinte peças reprovadas por mancha e quarenta peças novas. As peças reprovadas foram novamente decapadas e jateadas (para remoção total da anodização) e posteriormente enviadas para o teste. As peças novas seguiram o processo de usinagem, polimento, T6 e jateamento. Durante o caminho para a empresa terceirizada todas as peças chegaram com corrosão, sendo que as peças novas estavam em pior condição.

As peças reprovadas após o processo de anodização na empresa terceira foram inspecionadas visualmente e todas copiaram as manchas que haviam aparecido anteriormente.

As peças novas após o processo de anodização na empresa não apresentaram manchas na estrutura, apenas manchas oriundas da corrosão conforme apresenta a Figura 25.

Figura 25: Peça com corrosão antes (a) e após anodização (b)



Fonte: Autor/2021

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos, é possível dizer que a composição do material da matéria prima pode ter influência no surgimento dos defeitos tipo mancha como também, no processo de produção, pode ocorrer em algumas etapas condições que contribuem para o surgimento das manchas.

Na análise metalográfica apareceram estruturas de maior tamanho de grão na região da mancha. Isto pode estar relacionado ao descontrole das temperaturas durante o processo de extrusão e posterior resfriamento. A análise de fluorescência de raio X mostrou que a matriz da liga apresenta majoritariamente alumínio na sua composição com pequena presença de alguns elementos de liga, porém a análise não apresentou conclusão satisfatória quando foi comparado uma peça similar e sem manchas, e não apresentaram diferença significativa na composição química quando comparadas com a norma técnica.

Na análise de micrografia eletrônica de varredura apareceram diferenças entre as duas áreas da análise, se verificou que a área manchada apresentou maior porosidades. Na região próxima ao furo da peça verificou-se maior densidade de poros, o que pode estar relacionado a presença de tensões residuais neste local. O mapeamento de temperaturas no processo de T6 indica que não houve excessivo descontrole do parâmetro temperatura e, em princípio, as manchas não poderiam ser provenientes desta etapa do processo de fabricação.

Com base nos resultados dos testes realizados em linha de produção pode-se concluir que:

- As manchas podem ter diferentes origens, e talvez não sejam somente causas superficiais, pois o reprocessamento das peças manchadas não é suficiente para reparar o problema.
- É possível que a composição da matéria prima ou nos processos de produção dos fornecedores apresentem variações dos parâmetros de controle e que contribuem para a formação das manchas, pois ambos os fornecedores apresentaram as manchas.
- O processo interno de tratamento térmico T6, não indica que pode ser o causador das manchas.
- O metal pode apresentar variações locais de composição química na sua estrutura, e o banho pode ser o processo de revelação das manchas devido à variação da composição.
- O teste 5 indica que as manchas podem estar relacionadas com o processo de anodização da empresa em que este estudo de caso foi realizado. Nos processos de anodização (interno ou terceirizado) é onde vai se revelar as manchas.

Sugestões para trabalhos futuros

- Análise da amostra através de ensaios metalográficos com equipamentos específicos que indiquem diferentes fases no material, através de microscópio metalográfico.

- Análise de micro rugosidade superficial das peças defeituosas.
- Avaliação do processo produtivo das peças, verificar a influência da contaminação de banhos e os processos mecânicos de produção das peças.
- Alterar o tipo de abrasivo utilizado no processo de jateamento e avaliar os índices de reprovações por manchas.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Associação Brasileira de Alumínio.** Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 15 jul. 2021.

ALRASE. **ALRASE METAIS.** Disponível em: <<https://www.alrasemetais.com.br/aluminio-7075>>. Acesso em: 29 nov. 2021.

BROCHADO, J. P. B. **Otimização e rastreabilidade no setor de polimento e análises de defeitos em ligas de alumínio.** Porto-Portugal: Dissertação de mestrado - Universidade do Porto, 2016.

CANYOOK, R.; SEUBSOM, P.; SANG-NGEAN, J.; TRIRUJIRAPAPONG, T.; TAWEESUP, K. Influences of sealing solutions on anodized layer properties of 7075 aluminium alloy. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 3, p. 9483–9488, 2018.

CODARO, E. N. **Estudo da corrosão em ligas de alumínio utilizadas na indústria aeronáutica.** Guaratingueta-SP: Tese de livre-docência - Universidade Estadual Paulista, 2006.

DA SILVEIRA, F. B. Anodização - Tópicos do Processo. **Associação Brasileira de Tratamento de superfície**, v. 207, p. 52, mar. 2018.

DE ARAÚJO, D. J.; ROMERO, J. A DE S.; MADANI, F.S.; BARBIERI, F. C. Estudo Do Envelhecimento Artificial Da Liga De Alumínio 7075. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, n. 21, p. 5049–5057, 2014.

DEDAVID, B. A; GOMES, C. I; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura Aplicações e preparação de amostras. Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores.** Porto Alegre-RS: ed.EdiPUCRS, 2007.

DEMING, W. E. **Qualidade: A revolução da administração.** 1. ed. Rio de Janeiro - RJ: ed. Marques-Saraiva, 1990.

DICK, P. A. **Anodização Sulfúrica E Resistência À Corrosão Da Junta Dissimilar Entre As Ligas Aa7050 E Aa2024 Soldadas Pelo Método Friction Stir Welding.** Porto Alegre-RS: Dissertação de mestrado - PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

FARINHA, S. P. DE J. C. **Análise elementar de tumores e outras situações clínicas com base no método da fluorescência de raio-X.** Recife-PE: Dissertação de mestrado - Instituto Universitário Egas Moniz, 2020.

GONÇALVES, R. A. **Investigação da Usinabilidade das ligas de alumínio da série 6XXX.** Uberlândia-MG: Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

HYDRO. **Hydro.** Disponível em: <<https://www.hydro.com/pt-br/>>. Acesso em: 5 out. 2021.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MICROPALÉONTOLOGIA. **UNISINOS**. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/itt/>>. Acesso em: 5 out. 2021.

JÚNIOR, P. A. DE M. J. **O comportamento da corrosão sob tensão da liga 7075-T6 para futuras utilizações em projetos mecânicos**. Belo Horizonte-MG: Dissertação de mestrado - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2010.

LOURENÇO, J. C. **Determinação e quantificação dos fatores que geram defeitos superficiais em ligas de alumínio durante um processo de produção de peças aeronáuticas**. Lorena-SP: Trabalho de conclusão de curso - Universidade de São Paulo, 2014.

MACEDO, D. L. **Avaliação da influência dos níveis de corrente de soldagem com eletrodo rutilico E6013 via análise macrográfica**. Diamantina-MG: Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2012.

MAIA, A. M. P. **Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101**. Porto-Portugal: Universidade do Porto, 2012.

MATTOS, W. DA S. **Análise de Corrosão e Comportamento Mecânico de Ligas de Alumínio Aeronáutico 7075-T6 Após Tratamento Térmico usando a Técnica Uphill**. São Carlos-SP: Tese de doutorado - Universidade de São Paulo, 2018.

MENEGHESSO, A. A. Noções Básicas sobre Processo de Anodização do Alumínio e suas Ligas. **Artigo Técnico**, v. 1, p. 36–38, 2006.

MENEGHESSO, A. A. Noções Básicas sobre Processo de Anodização do Alumínio e suas Ligas. **Artigo Técnico**, v. 11, p. 32–33, 2008.

PINHEIRO, J. S. **Proteção da Liga 117075-T6 por anodização tartárico-sulfúrica e pós-tratamento com ácido hexafluorozircônico**. Porto Alegre-RS: Dissertação de mestrado - PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

RANA, R. S.; PUROHIT, R.; SCIENTIST, D. . Reviews on the Influences of Alloying elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys and Aluminum Alloy Composites. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 2, n. 6, p. 6, 2012.

REGONE, N. N. **Anodização de Ligas de Alumínio por Corrente Pulsada**. Campinas-SP: Tese de doutorado - Universidade Estadual de Campinas, 2004.

ROHDE, R. A. **Metalografia: preparação de amostras - Uma abordagem prática Versão 3.0**. Santo Ângelo-RS: LEMM Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, 2010.

SANTOS, E. S.; GAMA, E. M.; FRANÇA, R. DA S.; SOUZA, A. S.; MATOS, R. P. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X na Determinação de Espécies Químicas. **Enciclopédia Biofera**, v. 9, n. 17, p. 3413–3432, 2013.

SCARABOTTO, M. **Estudo da corrosão nas ligas de alumínio 3105 e 5052**. Porto Alegre-RS: Dissertação de mestrado - PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

SGSGROUP. **sgsgroup**. Disponível em: <<https://www.sgsgroup.com.br/>>. Acesso em: 5 out. 2021.

TRUJILLO, M. P. **Análise de Defeito de Anodização em Peça de Liga de Alumínio 6262-T6 Extrudada e Usinada**. São Paulo-SP: Trabalho de conclusão de curso - Universidade de São Paulo, 2015.

VILLANOVA, R. L. **Caracterização microestrutural e eletroquímica de ligas de alumínio anodizadas em meio sulfúrico**. Porto Alegre-RS: Tese de doutorado - PPGEM - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.