

# Análise de ligas e revestimentos resistentes à corrosão: o caso da STA

João Carlos Santos<sup>1)</sup>

1) Aluno do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais



Orientador FEUP: Prof. Doutor Luís Filipe Malheiros

Orientador STA: Eng.º José Pedro Costa

Outubro 2012

<i>CANDIDATO</i>	João Carlos Barros Fonseca dos Santos	<i>Código</i>	070508029
<i>Título</i>	Análise de ligas e revestimentos resistentes à corrosão: O caso da STA		
<i>DATA</i>	26 de Outubro de 2012		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F103 - 14:00h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professora Doutora Laura Maria Melo Ribeiro	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Delfim Fernandes Soares	DEM/EEUM
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira	DEMM/FEUP

“Esforça-te e tem bom ânimo...”



## AGRADECIMENTOS

Durante a realização deste mestrado deparei-me com alguns contratemplos, que, embora algumas vezes difíceis de ultrapassar, nunca foram motivo de desistência. Contudo, todos os imprevistos se tornaram mais fáceis de ultrapassar com a ajuda de pessoas extraordinárias que em muito contribuíram para o sucesso que é a sua conclusão. É no término desta etapa da minha vida que gostaria de apresentar o meu sincero agradecimento a todas essas pessoas.

Gostaria contudo de destacar alguns que, por motivos vários, tiveram um contributo especial na realização desta dissertação.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à empresa STA - Sociedade Transformadora de Alumínios, pela oportunidade que me concedeu ao permitir que este trabalho fosse lá realizado e por todo o apoio e condições proporcionadas.

Aos meus orientadores, o Prof. Doutor Luís Filipe Malheiros do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM) da FEUP e o Eng.º José Pedro Costa da STA, pela orientação e disponibilidade prestada na elaboração desta dissertação.

A todos os colaboradores dos diversos departamentos da STA pela disponibilidade demonstrada em colaborar com este projeto, em especial à Dr.ª Delfina, ao Eng.º Rui Costa, à Eng.ª Cristina Dantas, ao Eng.º Carlos Novais, ao Sr. Torres e ao Sr. Paulo.

À Eng.ª Cristina Nunes, pela disponibilidade e auxílio incansáveis na resolução de vários problemas.

Ao Prof. Doutor Fernando Jorge Monteiro, pela colaboração ao longo do trabalho.

Ao Sr. Ramiro e à D. Amélia pela sua colaboração sempre que assim foi preciso.

Ao meu primo Luís Moreira pela fantástica ajuda que me deu quando mais precisei.

À minha amiga Luísa Nobre pela disponibilidade e ajuda prestadas.

A todos os meus amigos e colegas de curso por toda a ajuda e colaboração ao longo de todo o meu período académico. Gostaria de agradecer especialmente à minha amiga Ana Santos pelo auxílio e suporte que me deu neste último semestre em vários momentos difíceis e ao meu amigo de sempre David Lado.

Por fim à minha família. Aos meus pais e irmão. Aos meus pais por sempre me apoiarem em todos os momentos, bons e menos bons, e sempre me impulsionaram a alcançar os mais altos objetivos. Ao meu grande irmão por ser o meu melhor amigo e significar tanto para mim. Especialmente a vocês, obrigado por estarem sempre presentes.

A todos um grande obrigado!

## ÍNDICE DE CONTEÚDOS

AGRADECIMENTOS .....	I
ÍNDICE DE CONTEÚDOS.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS .....	V
ÍNDICE DE TABELAS .....	VII
RESUMO .....	IX
ABSTRACT .....	XI
<b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	1
1.2 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA.....	1
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA .....</b>	<b>5</b>
2.1 ORIGEM DO ESTUDO.....	5
2.2 ALUMÍNIO.....	7
2.2.1 <i>Elementos de liga nas ligas de alumínio</i> .....	8
2.2.2 <i>Fundição Injetada</i> .....	10
2.2.2.1 Principais ligas selecionadas para a fundição injetada.....	11
2.2.2.2 Análise comparativa entre as ligas selecionadas para fundição injetada .....	12
2.2.3 <i>Fundição por Gravidade</i> .....	14
2.2.3.1 Principais ligas propostas para a fundição por gravidade .....	15
2.2.3.2 Análise comparativa entre as ligas para fundição por gravidade .....	16
2.2.4 <i>Conformação plástica</i> .....	16
2.2.4.1 Principais ligas propostas para conformação plástica .....	17
2.2.4.2 Análise comparativa entre as ligas para conformação plástica .....	18
2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS .....	19
2.3.1 <i>Elementos de Liga no Aço inoxidável</i> .....	20
2.3.2 <i>Conformação plástica</i> .....	22
2.3.2.1 Principais aços inoxidáveis propostos para conformação plástica .....	22
2.3.2.2 Análise comparativa entre os aços inoxidáveis para conformação plástica .....	23
2.4 PROCESSOS DE PROTEÇÃO DE SUPERFÍCIE .....	23
2.4.1 <i>Anodização</i> .....	24

2.4.1.1	Vantagens e desvantagens da anodização .....	25
2.4.2	<i>Pintura</i> .....	26
2.4.2.1	Vantagens e Desvantagens da pintura.....	29
2.4.3	<i>Cromatização</i> .....	31
2.4.3.1	Vantagens e Desvantagens da cromatização .....	32
2.4.4	<i>PVD</i> .....	32
2.4.4.1	Vantagens e desvantagens do PVD.....	33
2.5	ANODIZAÇÃO DE LIGAS DE FUNDIÇÃO INJETADA .....	34
<b>3</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>39</b>
3.1	SELEÇÃO DAS LIGAS .....	39
3.1.1	<i>Preparação das amostras</i> .....	40
3.1.1.1	Anodização .....	42
3.1.1.2	Pintura .....	43
3.1.1.3	Aço inoxidável .....	44
3.2	ANODIZAÇÃO DE LIGAS PARA FUNDIÇÃO INJETADA.....	44
3.2.1	<i>Seleção de ligas alternativas</i> .....	45
3.2.2	<i>Redução do tamanho de grão</i> .....	45
3.2.3	<i>Aplicação prévia de PVD</i> .....	46
3.3	TESTES EM CÂMARA DE NEVOEIRO SALINO .....	47
3.3.1	<i>Condições do ensaio</i> .....	47
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>55</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Organigrama da STA.....	3
Figura 2 - Perda de espessura do aço inoxidável ao longo do tempo quando exposto a ambiente marítimo (a) e a ambiente industrial (b) [3] .....	5
Figura 3 - Esquema simplificado do processo de fundição injetada [16].....	10
Figura 4 - Esquema simplificado da coquilha utilizada no processo de fundição por gravidade [16].....	14
Figura 5 - Enchimento manual de coquilha [27] .....	15
Figura 6 - Representação esquemática do sistema basculante do processo de vazamento por gravidade [28].....	15
Figura 7 - Influência do Crômio na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis [37] .....	20
Figura 8 - Aços inoxidáveis mais apropriados para aplicações em água pura, ambiente marítimo 20°C e água do mar a 20°C.....	23
Figura 9- Influência da espessura da camada anodizada na resistência à corrosão em três ambientes diferentes, ao final de oito anos, em ligas de alumínio [41] .....	26
Figura 10 - Esquema ilustrativo do processo PVD por <i>sputtering</i> [53] .....	33
Figura 11 - Esquema ilustrativo do processo PVD por deposição iônica [53] .....	33
Figura 12 - Efeito do teor de silício sobre a fluidez das ligas do sistema binário Al-Si [55] .....	35
Figura 13 - Imagem obtida em microscopia MEV da deposição de uma camada de Al puro sobre a liga AlMg <sub>9</sub> e respetiva camada anodizada [56].....	37
Figura 14 - Imagem representativa do puxador utilizado.....	40
Figura 15 - Coquilha utilizada no vazamento das várias ligas de alumínio.....	41
Figura 16 - Fusão do alumínio em forno de cadinho aquecido a gás.....	41
Figura 17 - Vazamento manual do alumínio a 750°C para a coquilha .....	41
Figura 18 - Radiografia de uma das peças que apresentou defeitos (assinalados pelo quadrado).....	42
Figura 19 - Imagem de uma das amostra cortadas após observação dos defeitos por raios-X.....	42

Figura 20 - Amostra pintada com Pó RAL 9505 <i>Polyester</i> preto .....	43
Figura 21 - Amostra pintada com Pó RAL 9006 Silver Mate cinzento .....	43
Figura 22 - Amostra do aço inoxidável AISI 304 .....	44
Figura 23 - Amostra do aço inoxidável AISI 316 LN .....	44
Figura 24 - Liga de alumínio AlSi <sub>7</sub> após anodização.....	45
Figura 25 - Liga de alumínio Ag4Z após anodização .....	45
Figura 26 - Microestrutura da liga de alumínio AlSi <sub>7</sub> sem tratamento térmico .....	46
Figura 27 - Microestrutura da liga de alumínio AlSi <sub>7</sub> após tratamento térmico T6 (ver Tabela 25).....	46
Figura 28 - Amostra revestida por PVD após anodização e tratamento químico de limpeza da camada anodizada .....	47
Figura 29 - Posicionamento das amostras na câmara de nevoeiro salino de dois ângulos diferentes.....	48
Figura 30 - Imagem obtida em microscópio ótico que apresenta a degradação da amostra de AlSi <sub>7</sub> por deposição de Al[OH] <sub>3</sub> .....	50

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Potenciais eletroquímicos de vários metais em relação a um eletrodo de referência [4] .....	7
Tabela 2 - Composição química da liga A356.0, T6, AlSi <sub>7</sub> (% peso) [17] .....	11
Tabela 3 - Composição química da liga A413.2: LM6-M, AlSi <sub>12</sub> (% peso) [17] .....	11
Tabela 4 - Composição química da liga S360.0: LM9-M, AlSi <sub>12</sub> Mg (% peso) [17] .....	12
Tabela 5 - Composição química da liga S443.0: LM18-M, AlSi <sub>5</sub> (% peso) [17] .....	12
Tabela 6 - Algumas propriedades mecânicas bem como ponto de fusão das ligas de alumínio selecionadas [17] .....	13
Tabela 7 - Composição química da liga AlSi <sub>9</sub> Cu <sub>3</sub> (% peso) [24] .....	13
Tabela 8 - Composição química da liga AlSi <sub>10</sub> Mg (% peso) [24] .....	13
Tabela 9 - Composição química da liga AG4Z [24] .....	15
Tabela 10 - Composição química da liga Am3ST [24] .....	15
Tabela 11 - Composição química da liga de alumínio 5052 H38 (% peso) [17] .....	17
Tabela 12 - Composição química da liga de alumínio 5086, H38 (% peso) [17] .....	18
Tabela 13 - Composição química da liga de alumínio 5251, H8 (% peso) [17] .....	18
Tabela 14 - Composição química da liga de alumínio 5456 H321 (% peso) [17] .....	18
Tabela 15 - Algumas propriedades mecânicas bem como ponto de fusão das ligas de alumínio selecionadas [17] .....	19
Tabela 16 - Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 304 LN (% peso) [17] .....	22
Tabela 17 - Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 316LN (% peso) [17] .....	22
Tabela 18 - Algumas propriedades mecânicas bem como ponto de fusão dos aços inoxidáveis selecionados [17] .....	23
Tabela 19 - Revestimentos orgânicos mais adequados para resistência à corrosão em diversas aplicações [41] .....	28
Tabela 20 - Características de vários tipos de revestimentos e suas vantagens e desvantagens, bem como principais aplicações [41] .....	29
Tabela 21 - Tipo de pó a utilizar em função da sua aplicação [50] .....	30

Tabela 22 - Comparação entre <i>Epoxy</i> , <i>Epoxy-Polyester</i> e <i>Polyester</i> segundo algumas propriedades (+++ Excelente; ++ Muito bom; + Bom; 0 Aceitável; - Mau) [50]	31
Tabela 23 - Dados recolhidos da bibliografia sobre os ensaios realizados em câmara de nevoeiro salino com a liga de alumínio 3003 [41] .....	32
Tabela 24 - Quadro resumo das principais diferenças, em termos de condições de processamento, entre os processos de <i>sputtering</i> e deposição iónica [53] ....	34
Tabela 25 - Sequência do tratamento térmico T6 para a liga de alumínio 356.0 [12] .....	36
Tabela 26 - Ligas selecionadas para o estudo .....	40
Tabela 27 - Sequência das etapas de anodização utilizada na STA .....	43
Tabela 28 - Tratamento químico de remoção da camada anodizada .....	46
Tabela 29 - Tratamento químico de desoxidação e limpeza .....	47
Tabela 30 - Análise do aspeto visual das amostras ao longo do ensaio (+ sem vestígios de corrosão; - com vestígios de corrosão).....	49
Tabela 31 - Imagens representativas dos vestígios de corrosão observadas nas amostras .....	49

## RESUMO

A corrosão é um dos problemas com o qual as diferentes indústrias, nomeadamente a de transformação de metais, têm de lidar. O desenvolvimento do tema abordado neste trabalho foi realizado em estreita colaboração com a empresa STA - Sociedade Transformadora de Alumínios, SA e prende-se com a criação de uma nova linha de produtos que possuam características mais favoráveis para resistir a ambientes corrosivos, distinguindo-se assim das restantes ofertas disponíveis no mercado. Para esse efeito foram selecionadas várias ligas com boas características de resistência à corrosão, adequadas a cada um dos processos de fundição (injetada ou por gravidade) assim como aos processos de conformação plástica realizados na empresa. Por outro lado, o tema dos revestimentos de superfícies também foi abordado, tendo-se apresentado um conjunto de sugestões relativas aos processos de anodização, pintura, cromatização e PVD de forma a incrementar a resistência dos produtos à corrosão. Por fim procurou-se encontrar uma solução para um problema enfrentado pela empresa que se prende com a anodização de peças provenientes da fundição injetada, procurando aumentar a produtividade e a qualidade das peças.

Foi possível concluir que os tratamentos de proteção de superfície testados - a pintura e a anodização - quando aplicados corretamente e aos materiais mais indicados, são bastante eficazes na proteção das peças contra a corrosão.

Não se obteve uma conclusão objetiva quanto à anodização de peças de alumínio produzidas por fundição injetada uma vez que não foi possível avaliar todas as soluções apresentadas.

*Palavras-Chave:* Corrosão; Ligas de alumínio; Aço inoxidável; Proteção de superfícies; Fundição injetada; Anodização.



## ABSTRACT

One of the major problems that many industries included the metals industry has to deal it's the corrosion. This study was developed in collaboration with STA - Sociedade Transformadora de Alumínios, SA and has the purpose of finding a new product line with the best resistance to corrosive environment as well as taking the leadership in the market. To this particular study, with the casting processes (high pressure die casting and die casting) and forming processes, were selected several alloys with high resistance to corrosion. The coating was studied as well trying to find new conclusions about anodizing, painting, chromating and PVD in order to increase the products resistance to corrosion. Lastly, it tried to find a solution to a problem faced by the company, which deals with anodizing parts produced by high pressure die casting; whose the main goal is to increase productivity and quality of parts.

It was possible to infer that the surface coatings (painting and anodizing) when applied to the correct materials are very effective to protect against corrosion.

It wasn't possible to conclude about high pressure die casting aluminum anodizing parts because it was not possible to evaluate all the presented solutions.

*Key-words:* Corrosion; Aluminium alloys; Stainless steel; Surface protection; High pressure die casting; Anodizing.



# 1 INTRODUÇÃO GERAL

## 1.1 Introdução

Este trabalho está integrado na disciplina de Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e foi levado a cabo em conjunto com a empresa STA - Sociedade Transformadora de Alumínios, SA durante um período de aproximadamente cinco meses. Aborda-se a temática da corrosão nas ligas de alumínio e aço inoxidável visto que a empresa processa tanto ligas de alumínio, como a AlSi<sub>10</sub>, a AG4Z e a Am3ST, e o aço inoxidável AISI 304. Também se tratam outros assuntos relacionados com este tema como, por exemplo, a proteção de peças que vão operar em ambientes corrosivos. O tratamento de anodização em peças de alumínio obtidas por fundição injetada é também um tema abordado neste trabalho. Pretende-se que as soluções avançadas possibilitem a criação de uma nova linha de produto para a empresa.

A principal base de pesquisa desta tese de mestrado foi o CES Edupack 2012 da marca Granta. Este é um software de ensino líder mundial na pesquisa de materiais em engenharia, ciência, processamento e design. Através deste software foi possível selecionar muitas das ligas e soluções apresentadas ao longo desta dissertação.

## 1.2 Apresentação da Empresa

A STA - Sociedade Transformadora de Alumínios, SA tem a sua origem em 1989 a partir de uma parceria com a Sobinco, uma sociedade belga, adquirindo o estatuto de representante da marca SOFI, a qual já existe há mais de 40 anos. É uma empresa especializada no desenvolvimento e produção de aplicativos e sistemas para portas e janelas, com especial foco para caixilharias de alumínio.

Em 2006 obteve a certificação segundo a norma ISO 9001:2000 e possui atualmente cerca de 155 profissionais qualificados. A STA define-se como referência em termos de Tecnologia, Inovação, Design, Qualidade e Durabilidade. A STA tem uma produção anual que ronda as 495 ton, das quais 60 em ligas para fundição por

gravidade e as restantes em ligas para fundição injetada. A STA utiliza diferentes ligas consoante o processo usado para a sua transformação. Na fundição por gravidade, são processadas duas ligas de especificação interna, a AG4Z e a Am3ST, enquanto que, na fundição injetada, as ligas utilizadas são a  $AlSi_9Cu$  e a  $AlSi_{10}Mg$ . Quanto à conformação plástica, a STA processa o aço inoxidável austenítico AISI 304.

Por sua vez, a Sobinco, fundada em 1961, apresenta uma atividade semelhante à da STA com a particularidade de desenvolver soluções mais direcionadas para as necessidades das empresas extrusoras e gamistas. Esta empresa possui um grande prestígio internacional, sendo líder na Europa na sua área de intervenção, empregando cerca de 350 profissionais e exportando para 60 países distribuídos por 5 continentes.

STA e Sobinco apostam fortemente numa relação estreita ao nível da investigação e desenvolvimento de novos produtos, maximizando o seu *know-how* ao partilhar os seus potenciais tecnológicos e industriais.

#### **Visão segundo a STA:**

Liderar os mercados em que atua, sendo avaliada pelos seus clientes, na satisfação, profissionalismo, qualidade e inovação.

Desejar que a equipa combine conhecimento técnico com o reconhecimento das necessidades dos clientes bem como dos mercados onde atuam.

Procurar que a base do seu serviço sejam os seus colaboradores motivados e a acreditar no valor do seu trabalho.

#### **Missão segundo a STA:**

A missão da STA consiste em produzir e comercializar ferragens para portas, janelas e respetivos serviços associados, que satisfaçam as necessidades dos clientes com o respeito pelos acionistas, colaboradores e comunidade envolvente.

Na Figura 1 encontra-se representado o organigrama da STA, com todos os seus departamentos, sendo que os que se encontram destacados a azul são os que tiveram um envolvimento mais direto neste trabalho.

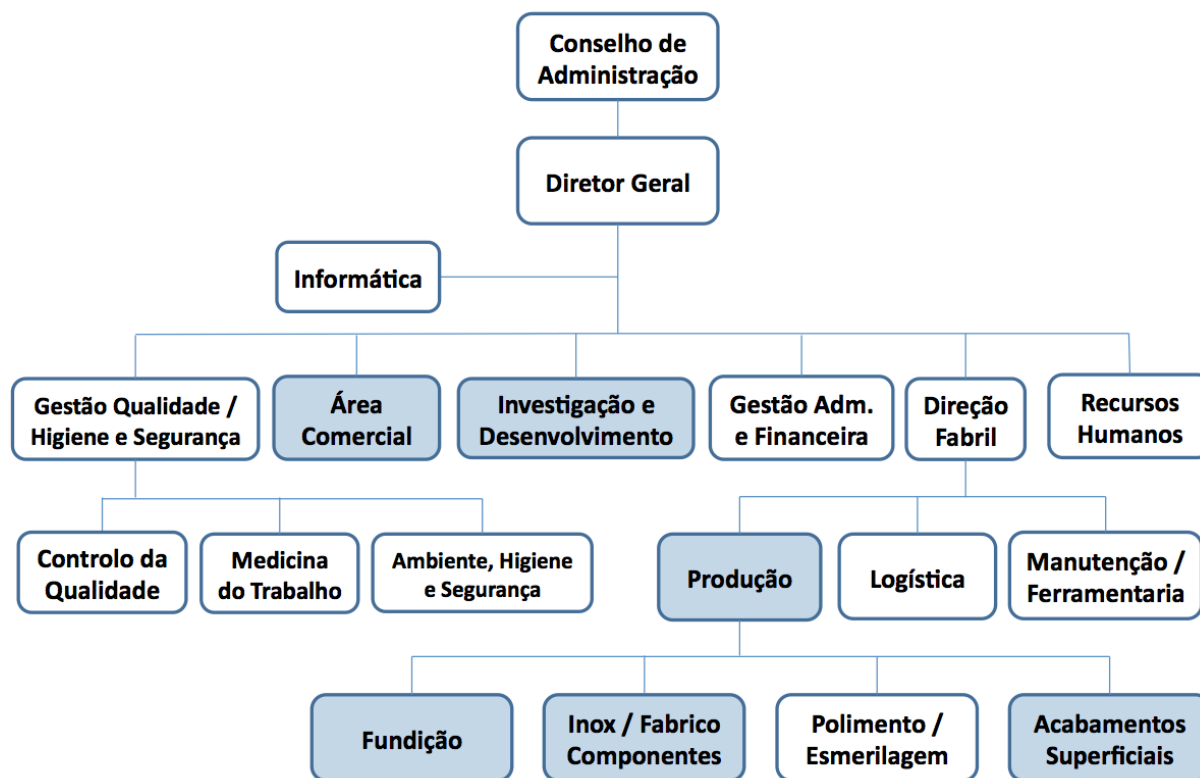


Figura 1 - Organograma da STA

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em 4 secções ao longo das quais se descreve de forma pormenorizada tanto o trabalho de pesquisa bibliográfica como o experimental.

Na primeira secção apresenta-se uma descrição sumária dos objetivos da dissertação, introduzindo-se o tema tratado.

A segunda secção constitui a introdução teórica do estudo, onde se apresentam propostas de resolução de dois problemas. O primeiro pretende a criação de uma nova linha de produto com boa resistência à corrosão, e o segundo a apresentação de uma solução que possibilite a aplicação do tratamento superficial de anodização a ligas de fundição injetada. Assim sendo, nesta secção são abordados, do ponto de vista teórico, o tema da corrosão no alumínio e aço inoxidável, incluindo a análise das características mais associadas à corrosão nestas famílias de metais e a apresentação de algumas soluções com boa resistência à corrosão, como algumas ligas e revestimentos. Por outro lado, são apresentadas, também de âmbito teórico,

algumas soluções que poderão viabilizar a aplicação do tratamento de anodização nas ligas de fundição injetada.

Na terceira secção deste trabalho apresentam-se os testes desenvolvidos e respetivos resultados que procuram credibilizar as propostas abordadas na parte teórica.

Finalmente, na quarta secção, apresenta-se a discussão dos resultados, as conclusões deste trabalho e considerações futuras.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

De uma maneira geral, os metais, através da sua superfície, podem dar uma impressão de durabilidade, mas todos eles, à exceção do ouro, são quimicamente instáveis quando expostos ao ar, à humidade ou a ambientes mais agressivos, como o marítimo ou chuvas ácidas. Por esta razão, a utilização dos metais em engenharia e a sua comercialização estão muito dependentes do seu comportamento à corrosão; daí que a seleção de um metal adequado ao ambiente onde este irá ser utilizado, bem como a escolha do mecanismo de proteção apropriado, sejam bastante importantes [1].

Em alguns casos o metal providencia a sua própria proteção através da passivação, que é o processo de formação de uma camada protetora que se forma naturalmente na sua superfície, através da reação com o ar, que inibe continuação da corrosão do mesmo. Noutros metais isso já não acontece, sendo necessária a criação de uma camada protetora. Assim, a corrosão acontece quando a camada protetora ou o mecanismo de proteção são destruídos, deixando o metal vulnerável ao meio ambiente [1].

### 2.1 Origem do estudo

Este trabalho incide sobre um problema que ocorreu com “testas de fechaduras” fornecidas pela STA. Estas peças foram produzidas a partir do aço inoxidável ferrítico AISI 430, tendo estado expostas a ambiente marítimo, um dos meios mais corrosivos para o aço inox, como se apresenta nos gráficos da Figura 2 [2].

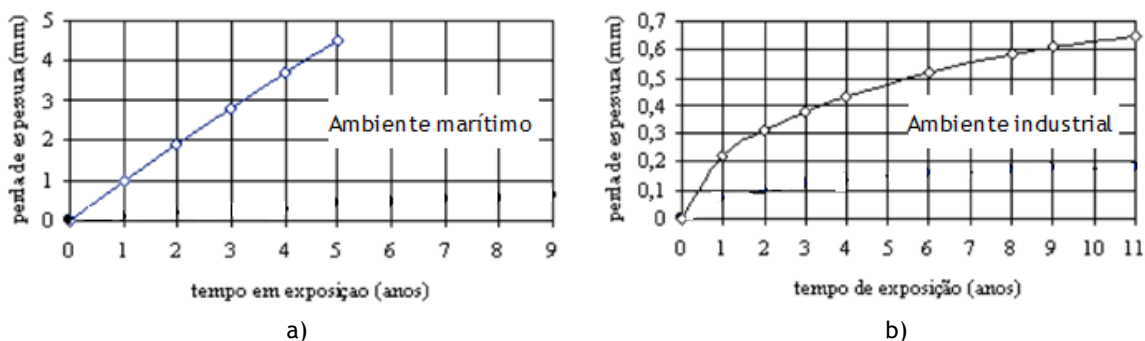


Figura 2 - Perda de espessura do aço inoxidável ao longo do tempo quando exposto a ambiente marítimo (a) e a ambiente industrial (b) [3]

Aproximadamente três semanas após a aplicação das peças começaram a surgir indícios de oxidação, originando a reclamação por parte do cliente e a consequente retoma das peças por parte da STA. O problema foi solucionado produzindo as mesmas peças, mas desta vez em alumínio realizando uma anodização com uma camada com cerca de 20  $\mu\text{m}$  de espessura; quando não há nenhuma especificação por parte do cliente, a STA anodiza as suas peças criando uma camada de espessura entre os 10  $\mu\text{m}$  e os 15  $\mu\text{m}$ . Esta solução, porém, acarreta custos acrescidos na produção, sentindo a empresa a necessidade de criar uma nova linha de produto com melhores características de resistência à corrosão. Esta ação permitirá evitar problemas idênticos ao ocorrido, constituindo simultaneamente um fator de diferenciação da concorrência.

Neste trabalho apresentam-se várias ligas com boa resistência à corrosão, adequadas a cada um dos processos da empresa: fundição injetada ou por gravidade, no caso do alumínio, e conformação plástica no caso do aço inoxidável. Uma vez que as ligas abordadas pertencem à família dos alumínio e dos aços inoxidáveis, os principais elementos de liga que podem influenciar as características das mesmas são apresentados de forma detalhada.

Por outro lado, o desenvolvimento dinâmico da indústria deposita grandes expectativas na área do ajuste das propriedades dos materiais de maneira que estes cumpram os requisitos impostos pelas suas condições de operação ou aplicações. O revestimento de superfícies é uma das ferramentas que possibilita a alteração de algumas das propriedades dos materiais, como por exemplo a sua resistência à corrosão, motivo pelo qual se apresentam algumas técnicas de proteção de superfície que permitem melhorar essa resistência. Através destas soluções, espera-se que seja possível solucionar outro problema de produção enfrentado pela STA. Como já foi mencionado, na empresa são produzidas peças em alumínio tanto por fundição injetada como por fundição em coquilha. O volume de produção em fundição injetada é muito superior ao da fundição por gravidade; contudo, não é possível aplicar o tratamento de anodização sobre as peças produzidas através deste processo uma vez que as ligas utilizadas apresentam características que impossibilitam a sua anodização. Portanto, quando é necessário anodizar algum tipo destas peças para uma determinada aplicação, esta tem de ser produzida em fundição por gravidade, para que a camada anodizada resultante

apresente o aspeto visual desejado. Pretende-se então, encontrar alguma alternativa através da qual seja possível anodizar peças provenientes da fundição injetada, aumentando assim os níveis de produção.

## 2.2 Alumínio

A resistência à corrosão do alumínio está dependente do filme protetor resultante da reação entre o alumínio e o oxigénio, que se forma à sua superfície, devido à passivação, e que se denomina alumina  $Al_2O_3$ . Este filme de óxido tem a capacidade de se auto-reparar, renovando-se rapidamente cada vez que é danificado. Por esta razão, para que o alumínio ou as suas ligas sofram algum tipo de corrosão necessitam estar sujeitos a um desgaste mecânico contínuo ou expostos a condições que promovam a degradação local do filme de óxido. A corrosão galvânica também pode representar um problema para o alumínio quando este é aplicado em estruturas complexas juntamente com outros metais de construção comuns, como o aço, aço inox, titânio, cobre e/ou ligas de níquel. Nestas circunstâncias, o alumínio tem tendência a ser corroído em detrimento dos outros metais, devendo-se isto ao facto deste ser anódico relativamente à maioria daqueles elementos, ou seja, por apresentar um potencial eletroquímico inferior, como pode ser observado na tabela da Tabela 1.

O alumínio é normalmente utilizado pela sua boa resistência à corrosão atmosférica, em ambientes marítimos ou industriais, podendo em muitos casos ser usado sem proteção de superfície e com apenas algumas preocupações mínimas de manutenção.

Material	Potencial (volt)
Magnésio comercialmente puro	-1,75
Liga de Mg (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	-1,60
Zinco	-1,10
Liga de Alumínio (5% Zn)	-1,05
Alumínio comercialmente puro	-0,80
Aço estrutural (limpo e polido)	-0,50/-0,80
Aço estrutural (oxidado)	-0,40/-0,55
Cobre, latão, bronze	-0,20

Tabela 1 - Potenciais eletroquímicos de vários metais em relação a um eléctrodo de referência [4]

### 2.2.1 Elementos de liga nas ligas de alumínio

A adição de elementos de liga ao alumínio permite a alteração das suas propriedades, como por exemplo o seu potencial eletroquímico, que pode tornar-se mais ou menos negativo consoante o elemento adicionado. O magnésio, o zinco e o silício, embora este último com menor impacto, tendem a influenciar o potencial no sentido anódico (negativo) enquanto que o cobre produz o efeito contrário, tornando o potencial mais catódico. Por sua vez, a redução do potencial eletroquímico favorece a passivação/resistência à corrosão do alumínio. Por este motivo, a par do alumínio puro, as ligas que apresentam melhores características de resistência à corrosão são as que pertencem às séries 3xxx (Al-Mn), 5xxx (Al-Mg) e 6xxx (Al-Mg-Si), para conformação plástica, e 3xx.x (Al-Si-Mg) para fundição.

Apresentam-se de seguida, de forma mais detalhada, alguns dos principais elementos de liga das ligas de alumínio bem como a sua influência.

*Magnésio (Mg):* Como já foi referido, o magnésio é um dos elementos de liga com um papel preponderante no aumento da resistência à corrosão do alumínio, proporcionando ainda um melhor acabamento superficial e uma boa relação entre resistência e ductilidade nas ligas para fundição. O magnésio pode ser encontrado em teores consideráveis nas ligas das séries 5xxx (Al-Mg) e 6xxx (Al-Mg-Si), para conformação plástica, e nas ligas das séries 3xx.x (Al-Si-Mg) e 5xx.x (Al-Mg), para fundição; para as ligas do sistema binário de Al-Mg, o teor de Mg situa-se entre os 4 e os 10% (pp) [5, 6, 7].

*Cobre (Cu):* A adição de cobre às ligas de alumínio tem como principal finalidade o aumento da resistência mecânica e dureza, bem como de proporcionar a aptidão para tratamento térmico de endurecimento por precipitação em ligas que possuam um teor de cobre entre os 4 e os 5,5% (pp). Por outro lado, o cobre é responsável pela diminuição da resistência à corrosão das ligas de alumínio, estando estas sujeitas à corrosão intergranular logo a partir de um teor de cobre de 0,07% (pp) [5, 6, 7, 8, 9].

*Manganês (Mn):* A presença de manganês nas ligas de alumínio proporciona um ligeiro aumento da resistência à corrosão, sendo este mais significativo quando se tratam de ligas para conformação plástica, como por exemplo as da série 3xxx,

indicadas para aplicações de exterior, mesmo sem qualquer tipo de proteção [5, 6, 10].

*Silício (Si):* O silício proporciona um ligeiro aumento da resistência à corrosão; contudo, a sua principal vantagem centra-se na melhoria das características de fundição das ligas destinadas a esse processo, aumentando substancialmente a fluidez do metal líquido. De uma maneira geral é possível definir um teor ideal de silício para os processos de fundição. Deste modo, para processos que apresentam uma baixa taxa de arrefecimento, como por exemplo fundição em areia, o teor de silício deverá situar-se entre 5% e 7% (pp), enquanto que, para processos de fundição em coquilha, deverá ser entre 7% e 9% (pp) e, para processos de fundição injetada, entre 8% e 12% (pp). Estes valores baseiam-se na relação entre a taxa de arrefecimento e a fluidez do banho e o efeito da percentagem de eutético na alimentação. O efeito positivo do silício na fluidez do metal líquido deve-se ao facto da sua presença promover um aumento do ponto de fusão da liga, fazendo com que, no momento da solidificação, a liga se mantenha no estado líquido durante mais tempo. A adição de silício também é acompanhada pela redução da densidade relativa bem como do coeficiente de expansão térmica [5, 7, 11, 12].

*Ferro (Fe):* Tanto nas ligas para fundição como para conformação plástica, a adição de ferro às mesmas provoca uma redução da resistência à corrosão e da ductilidade. Nas ligas para fundição, o ferro é responsável por aumentar a resistência mecânica das ligas de alumínio a elevadas temperaturas devido à sua tendência para formar fases intermetálicas, como o  $FeAl_3$ , o que provoca também a fragilização da microestrutura. Com o aumento do teor de ferro também cresce o número de fases insolúveis, o que piora as características de alimentação das ligas para fundição [5].

*Titânio (Ti):* A adição de titânio provoca uma redução do tamanho de grão, originando uma maior resistência mecânica, melhor acabamento superficial e redução de tensões internas [5, 12, 13].

*Zinco (Zn):* A adição deste elemento às ligas de alumínio proporciona apenas um ligeiro aumento da resistência à corrosão ambiental; quando adicionado juntamente com cobre e/ou magnésio, o zinco melhora a aptidão destas ao tratamento térmico [5, 6].

**Crômio (Cr):** Na maior parte dos casos, o crômio é adicionado em baixas concentrações a sistemas termicamente instáveis, que têm tendência a promover o crescimento de grão durante o envelhecimento à temperatura ambiente. Assim, o crômio, que normalmente forma o composto  $\text{CrAl}_7$ , é adicionado para controlar o crescimento de grão. Em algumas ligas também melhora a resistência à corrosão [5, 12].

### 2.2.2 Fundição Injetada

A fundição injetada surge na indústria, inicialmente associada ao ramo automóvel, devido à crescente necessidade de produzir peças cada vez mais leves, ao menor custo possível, que apresentem bom acabamento superficial, elevada precisão dimensional e possibilidade de reciclagem; é aplicada a um grande número de ligas, das quais se destacam as ligas de alumínio [14, 15].

Este processo é caracterizado por ser totalmente automático e de elevada produtividade, podendo gerar fundidos desde poucos gramas até vários quilogramas. Sinteticamente poder-se-á afirmar que, a fundição injetada consiste na injeção de metal líquido a elevada pressão, por ação de um pistão, para uma cavidade de moldação com a forma pretendida, onde permanece até solidificar, como se observa no esquema da Figura 3. Uma vez solidificada, a peça é retirada e em seguida são extraídos os ataques da mesma para que possam ser realizadas as operações de acabamento pretendidas [14, 15].

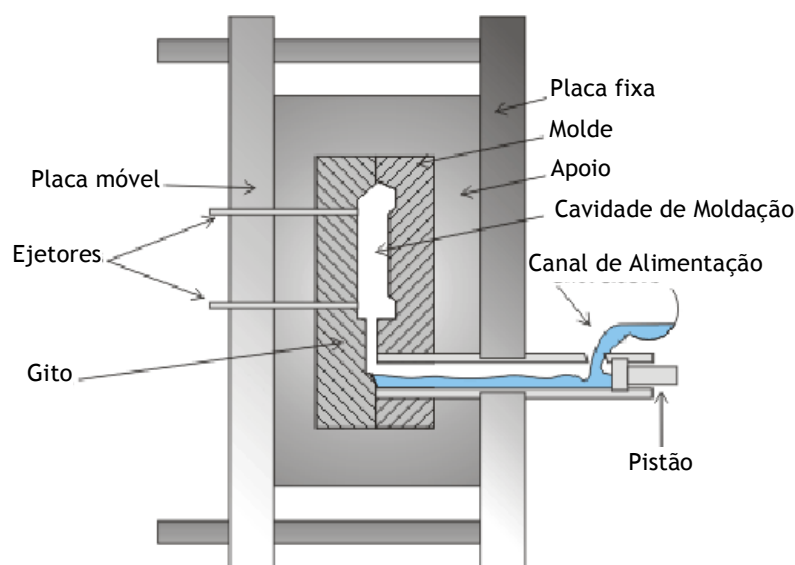


Figura 3 - Esquema simplificado do processo de fundição injetada [16]

### 2.2.2.1 Principais ligas selecionadas para a fundição injetada

Apresentam-se de seguida quatro ligas que apresentam boa resistência à corrosão, passíveis de serem processadas em fundição injetada.

A liga A 356.0-T6 (AlSi<sub>7</sub>) pertence à família das ligas de alumínio da série 3xx.x visto possuir como principais elementos de liga o silício (7%) e o magnésio (0,35%), como se pode observar na Tabela 2. As ligas desta série são conhecidas por apresentarem ótimas características para fundição, boa aptidão a tratamentos térmicos e excelente resistência à corrosão. Na nomenclatura desta liga os sufixos “0” e “T6” representam os tratamentos térmicos de recozimento e solubilização seguidos de envelhecimento artificial, realizados sobre a liga, respetivamente. Esta liga pode ser usada no fabrico de jantes de automóveis, peças de avião, como por exemplo flaps, ou bombas de combustível, aplicações onde é necessária uma boa resistência à corrosão aliada a boa resistência mecânica [2, 5, 6, 17, 18, 19].

Al(%)	Si(%)	Mg(%)	Cu(%)	Ti (%)	Fe(%)	Zn(%)	Mn(%)
91-92	6,5-7,5	0,25-0,45	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1

Tabela 2 - Composição química da liga A356.0, T6, AlSi<sub>7</sub> (% peso) [17]

A liga de alumínio A 413.2 LM6-M (AlSi<sub>12</sub>) é uma liga eutética que pertence à série 4xx.x pois o principal elemento de liga é o silício (12%), como se apresenta na Tabela 3. Após a fusão, durante o arrefecimento, esta liga sofre uma contração pouco relevante o que reduz significativamente a criação de tensões internas. A liga pode ainda revelar-se difícil de maquinar, problema que pode ser contornado recorrendo a fluidos de corte ou ferramentas de corte em metal duro sinterizado. Esta família de ligas apresenta boa resistência à corrosão, quer atmosférica, quer em meios aquosos. Devido às suas características, é muito utilizada para elementos decorativos e equipamentos médicos [5, 6, 17, 20, 21].

Al(%)	Si(%)
88	12

Tabela 3 - Composição química da liga A413.2: LM6-M, AlSi<sub>12</sub> (% peso) [17]

A liga S 360.0(a) LM9-M, ou AlSi<sub>12</sub>Mg, é igualmente uma liga da série 3xx.x que, embora possua uma composição química semelhante à da liga A 413.2, como se apresenta na Tabela 4, tem Mg na sua composição. A presença de Mg na composição química desta liga promove o aumento da resistência à fadiga, sendo

esta a única propriedade mecânica que se apresenta superior em relação às propriedades da liga A 413.2 (ver Tabela 6). As características de fundição desta liga são muito semelhantes às da liga A 413.2 e a sua resistência à corrosão é considerada muito boa, mesmo quando exposta a ambientes marítimos [6, 17, 21, 22 ,23].

Al(%)	Si(%)	Mg(%)
87,5	12	0,5

Tabela 4 - Composição química da liga S360.0: LM9-M, AlSi<sub>12</sub>Mg (% peso) [17]

De todas as ligas apresentadas, a liga de alumínio S 443.0 LM18-M (AlSi<sub>5</sub>), da série 4xx.x, é a que apresenta propriedades mecânicas inferiores (ver Tabela 6), mantendo uma boa resistência à corrosão. É também uma liga do sistema binário alumínio-silício, apresentando um teor de 5% de silício (ver Tabela 5). Contudo, é também a que apresenta o preço relativo mais baixo, como se apresenta na Tabela 6. É uma liga indicada para ambientes marítimos, aplicável por exemplo em acessórios de construção civil que se destinam a ser instalados em habitações que se situam junto à praia [6, 17, 21].

Al(%)	Si(%)
95	5

Tabela 5 - Composição química da liga S443.0: LM18-M, AlSi<sub>5</sub> (% peso) [17]

#### ***2.2.2.2 Análise comparativa entre as ligas selecionadas para fundição injetada***

As ligas que apresentam as melhores características mecânicas, juntamente com uma boa resistência à corrosão, são as ligas A 356.0-T6/AlSi<sub>7</sub> e A 413.2 LM6-M/AlSi<sub>12</sub> (ver Tabela 6). Contudo, estas ligas são as que apresentam o custo relativo mais elevado. Por outro lado, se o objetivo for produzir uma peça para uma aplicação que esta venha a estar sujeita a esforços cíclicos, e pondo de parte o seu custo relativo, é de esperar que a escolha recaia sobre a liga S 360.0(a) LM9-M/AlSi<sub>12</sub>Mg, pois, para além de conjugar uma boa resistência à corrosão, apresenta valores relativamente elevados de resistência à fadiga, bem como de resistência mecânica em geral [17].

Ligas	Tensão convencional de proporcionalidade a 0,2%(MPa)	Resistência à tração (MPa)	Dureza Vickers (HV)	Resistência à fadiga (MPa)	Temperatura de fusão (°C)
A 356.0-T6/AlSi <sub>7</sub>	152-234	221-310	77-103	60-90	554-615
A 413.2 LM6-M/AlSi12/Fe	131-145	276-303	55-60	37-45	565-576
S 360.0(a) LM9-M/AlSi12Mg	95-105	190-210	40-50	57-67	548-576
S 443.0 LM18-M/AlSi5	66-74	142-157	40-50	37-45	565-626

Tabela 6 - Algumas propriedades mecânicas bem como ponto de fusão das ligas de alumínio selecionadas [17]

As ligas de alumínio utilizadas pela empresa STA para fundição injetada são a AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> e a liga AlSi<sub>10</sub>Mg. Estas duas ligas pertencem à série 3xx.x; uma possui cobre e a outra magnésio. Na Tabela 7 e na Tabela 8 apresentam-se as composições químicas das ligas AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> e AlSi<sub>10</sub>Mg, respectivamente.

Al(%)	Si(%)	Mg(%)	Cu(%)	Ti (%)	Fe(%)	Cr(%)	Mn(%)
86	8-10	0,1-0,5	2,0-3,5	0,15	0,6-1,2	0,1	0,1-0,5

Tabela 7 - Composição química da liga AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> (% peso) [24]

Al(%)	Si(%)	Mg(%)	Cu(%)	Ti (%)	Fe(%)	Ni(%)	Mn(%)
87	10	0,2-0,5	0,1	0,2	1	0,15	0,55

Tabela 8 - Composição química da liga AlSi<sub>10</sub>Mg (% peso) [24]

Embora ambas pertençam à série 3xx.x, que apresenta ligas com boa resistência à corrosão, a AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> não está tão apta a resistir a ambientes corrosivos como a AlSi<sub>10</sub>Mg, em muito devido ao elevado teor de cobre, que se situa entre os 2,0 e os 3,5%, não sendo tão resistente quando aplicada em ambientes mais corrosivos, comparativamente às outras ligas selecionadas.

Uma vez que não apresenta teores tão elevados de cobre na sua composição como a liga AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub>, tendo por sua vez maior quantidade de silício e magnésio, a liga AlSi<sub>10</sub>Mg não é tão susceptível à corrosão como esta, pelo que pode ser considerada como uma boa solução para aplicações em meios corrosivos. As propriedades mecânicas desta liga também se revelam bastante boas, apresentando uma resistência à tração de 325 MPa, uma resistência à fadiga de 97 MPa e uma dureza de 120 HV [5, 17, 25].

### 2.2.3 Fundição por Gravidade

A fundição por gravidade é um processo de fundição mais simples em relação à fundição injetada. Tal como o nome indica, consiste no enchimento de uma cavidade, com metal líquido, usando apenas a força da gravidade, não recorrendo a qualquer tipo de pressão para introduzir o metal na moldação. Após introduzir o metal, este é deixado arrefecer até solidificar, sendo depois retirado da moldação para que se possa cortar o sistema de alimentação e gitagem e potenciais rebarbas.

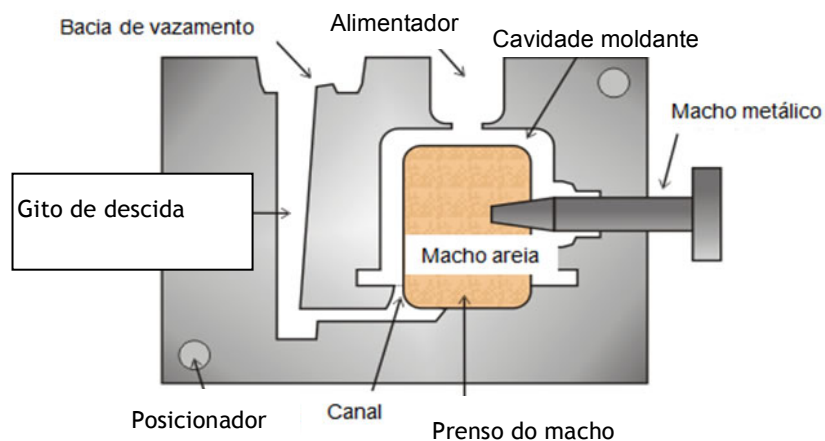


Figura 4 - Esquema simplificado da coquilha utilizada no processo de fundição por gravidade [16]

Este processo apresenta duas variantes: a estática e a basculante. No processo estático, o metal é vazado diretamente para o canal de alimentação pelo operador, como representado na Figura 5, enquanto que, no processo basculante, é necessário o recurso a um recipiente automatizado, para o qual o metal é vazado percorrendo, após isso, o canal de alimentação até preencher totalmente a cavidade de moldação, tal como se apresenta na Figura 6. O segundo processo tem a particularidade de operar segundo dois eixos, admitindo a movimentação da moldação para o ângulo que permita o melhor enchimento da mesma; além disso, torna possível eliminar as possíveis falhas de enchimento que, no primeiro caso, podem ser introduzidas por ação humana. Quando o molde utilizado é metálico, o processo denomina-se fundição em coquilha, como é o caso da STA [26].



Figura 5 - Enchimento manual de coquilha [27]

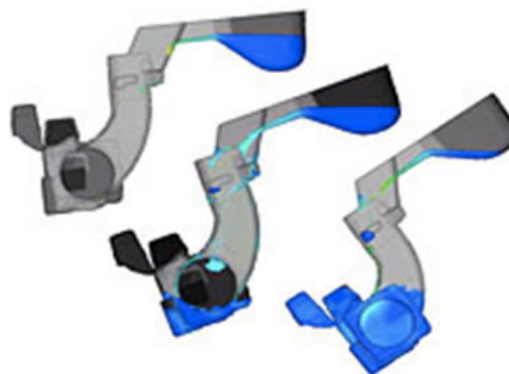


Figura 6 - Representação esquemática do sistema basculante do processo de vazamento por gravidade [28]

### 2.2.3.1 Principais ligas propostas para a fundição por gravidade

No processo de fundição por gravidade podem ser consideradas todas as ligas apresentadas no processo de fundição injetada, com exceção da liga S360.0(a) LM9-M,cast/AlSi<sub>12</sub>Mg. Assim, podem considerar-se as ligas de alumínio A356-T6 (AlSi<sub>7</sub>), A413,2 LM6-M (AlSi<sub>12</sub>) e S443,0 LM18-M (AlSi<sub>5</sub>), já descritas na secção referente à fundição injetada, cujas composições químicas se apresentam na Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 5, respetivamente [14].

Neste processo de fundição, a STA processa duas ligas de especificação interna: a AG4Z e a Am3ST. No que diz respeito à sua composição química, a primeira tem como principal elemento de liga o magnésio e a segunda o manganês, como se apresenta na Tabela 9 e na Tabela 10, respetivamente. Como se referiu anteriormente, as ligas que possuem como segundo elemento de liga o magnésio ou o manganês apresentam boa resistência à corrosão em vários tipos de ambientes, inclusive o marítimo.

Al(%)	Si(%)	Mg(%)	Ni(%)	Sn(%)	Pb(%)	Ti (%)	Fe(%)	Zn(%)	Mn(%)
92	0,5	3,2-5,4	0,05	0,05	0,05	0,2	0,55	0,9-1,45	0,3

Tabela 9 - Composição química da liga AG4Z [24]

Al(%)	Si(%)	Mg(%)	Ni(%)	Sn(%)	Pb(%)	Ti (%)	Fe(%)	Zn(%)	Mn(%)	Cu(%)
93	1-1,5	0,5	0,25	0,1	0,1	0,1-0,2	0,7	0,25	2-3	0,25

Tabela 10 - Composição química da liga Am3ST [24]

### *2.2.3.2 Análise comparativa entre as ligas para fundição por gravidade*

Quantos às ligas de alumínio AG4Z e a Am3ST, ao observar a sua composição química, é possível afirmar que face ao seu teor de Mg, pertencerá à família das ligas 5XX.X, que apresentam boa resistência à corrosão, principalmente em ambientes marítimos. De qualquer modo, as ligas apresentadas como alternativa para este processo já foram descritas na secção da fundição injetada (ver pág. 12). Nesse seguimento, a liga que apresenta melhores propriedades mecânicas é a AlSi<sub>7</sub>, seguida das ligas AlSi<sub>12</sub> e AlSi<sub>5</sub>. Ao nível da resistência à corrosão, todas essas ligas apresentam comportamentos muito semelhantes, embora o da liga A356.0-T6 possa ser considerado um pouco superior devido à presença de magnésio na sua composição química. Em termos de custos, a AlSi<sub>5</sub> revela-se a mais económica, seguida da AlSi<sub>12</sub> e da AlSi<sub>7</sub> [5].

### **2.2.4 Conformação plástica**

A conformação plástica envolve um conjunto de processos mecânicos que se destinam a alterar a geometria de metais no estado sólido, por deformação plástica, de maneira a que estes se conformem a moldes específicos e obtenham a forma pretendida consoante a aplicação a que se destinam. Esta deformação ocorre com o auxílio de ferramentas adequadas que podem variar desde pequenas matrizes até grandes cilindros. Neste processo, a temperatura é uma variável muito importante pois dela depende a classificação do processo como sendo a quente ou a frio. A realização da conformação plástica a quente deve-se ao facto de alguns materiais não possuírem a plasticidade necessária à sua deformação à temperatura ambiente. Além da temperatura existem outras variáveis que influenciam as propriedades do produto final, como a composição química do material, a intensidade da força aplicada durante a operação e a velocidade a que esta se processa, fazendo variar o grau de deformação a que o material é sujeito [29].

Existem essencialmente sete grandes processos de conformação plástica: o forjamento, a laminagem, a trefilagem, a extrusão, a estampagem, a estiragem e a dobragem.

### 2.2.4.1 Principais ligas propostas para conformação plástica

Uma vez que os processos de conformação utilizados na STA são o corte, a dobra e a estampagem, apresentam-se de seguida quatro ligas de alumínio da série 5xxx passíveis de serem processadas na empresa.

De todas as famílias das ligas de alumínio, a série 5xxx é a que melhor se adapta a ambientes corrosivos, incluindo o marítimo, devido ao elevado teor de Mg na composição química das suas ligas. As ligas desta família não são tratáveis termicamente, ou seja, não são endurecíveis por tratamento de envelhecimento, mas sim por solução sólida ou por encruamento [5, 12, 18, 30].

A liga de alumínio 5052 H38, também designada como ISO AlMg<sub>2,5</sub>, tem como segundo elemento maioritário o magnésio e é utilizada com o principal objetivo de resistir à corrosão. Na sua nomenclatura, a designação H38 permite concluir que esta liga sofreu encruamento e foi tratada termicamente a baixa temperatura (H3), sendo que o 8, em H38, significa que o endurecimento foi efectuado na sua totalidade. Como se apresenta na Tabela 11, esta liga possui uma quantidade significativa de Cr, o que, além de melhorar um pouco as características de resistência à corrosão, evita o crescimento do tamanho de grão, conferindo melhores características mecânicas à mesma. Quanto às suas aplicações, a liga ISO AlMg<sub>2,5</sub> é utilizada em muitos sectores, desde a construção civil, à indústria naval e automóvel, até aos utensílios domésticos, ou equipamentos para a indústria química e alimentar [2, 17, 30, 31].

Al(%)	Si(%)	Mg(%)	Cu(%)	Cr (%)	Fe(%)	Zn(%)	Mn(%)
96-97	0,25	2,2-2,8	0,1	0,15-0,35	0,4	0,1	0,1

Tabela 11 - Composição química da liga de alumínio 5052 H38 (% peso) [17]

A liga 5086 H38, devido ao elevado teor de Mg e a algum Ti presente na sua composição química (ver Tabela 12), é uma das que apresenta as melhores propriedades mecânicas da sua série. Uma vez que estas ligas possuem um elevado teor de Mg na sua composição química, que supera o seu limite de solubilidade no alumínio, em condições termodinamicamente favoráveis pode ocorrer a precipitação de alguns compostos de magnésio nas fronteiras de grão, fenómeno que, além de originar um ligeiro aumento da dureza, as torna mais suscetíveis à corrosão sob tensão. Ainda assim, a liga de alumínio 5086 é usada em aplicações

onde se encontra diretamente exposta à envolvente, como por exemplo em ambientes marítimos, sendo muitas vezes denominado de alumínio marítimo [12, 17, 32].

Al(%)	Si(%)	Mg(%)	Cu(%)	Cr (%)	Fe(%)	Zn(%)	Mn(%)	Ti(%)
94-95	0,4	3,5-4,5	0,1	0,05-0,25	0,5	0,25	0,2-0,7	0,15

Tabela 12 - Composição química da liga de alumínio 5086, H38 (% peso) [17]

A liga de alumínio 5251 H8, também designada por AlMg<sub>2</sub>, apresenta elevados teores de magnésio e manganês na sua composição química, como se apresenta na Tabela 13, o que lhe confere boas propriedades mecânicas associadas a uma excelente resistência à corrosão, principalmente em ambientes marítimos. Apresentando boa soldabilidade, esta liga é endurecível por conformação plástica, e de todas as ligas apresentadas é a que possui a menor resistência à fadiga, bem como a menor dureza (ver Tabela 15). Esta liga apresenta também uma vasta gama de aplicações, como por exemplo em barcos, aviões, cisternas ou na indústria automóvel [17, 33].

Al(%)	Mg(%)	Mn(%)
98	2	0,3

Tabela 13 - Composição química da liga de alumínio 5251, H8 (% peso) [17]

Finalmente, a liga de alumínio 5456 H321 é, de todas as ligas apresentadas, a que possui a melhor resistência à fadiga, adaptando-se muito bem a aplicações em que esteja sujeita a esforços cíclicos; contudo, o preço relativo é mais elevado. Devido ao elevado teor de Mg (ver Tabela 14), esta liga pode estar sujeita ao mesmo problema de precipitação de compostos de Mg nas fronteiras de grão da liga 5086. Apresenta uma boa soldabilidade e é usada normalmente em estruturas soldadas de alta resistência, aplicações marítimas e tanques de armazenamento [17, 34].

Al(%)	Si(%)	Mg(%)	Cu(%)	Cr (%)	Fe(%)	Zn(%)	Mn(%)	Ti(%)
92-94	0,25	4,7-5,5	0,1	0,05-0,2	0,4	0,25	0,5	0,2

Tabela 14 - Composição química da liga de alumínio 5456 H321 (% peso) [17]

#### 2.2.4.2 Análise comparativa entre as ligas para conformação plástica

De todas as ligas de alumínio apresentadas, a que oferece melhores propriedades mecânicas é a 5086, sendo o seu preço bastante semelhante ao das restantes ligas

anteriormente referidas. Contudo, todas as ligas são bastante equivalentes uma vez que todas apresentam excelente resistência à corrosão, sendo que, neste caso, o fator diferenciador para a tomada de decisão será a resistência mecânica [17].

Ligas	Tensão convencional de proporcionalidade a 0,2%(MPa)	Resistência à tração(MPa)	Dureza Vickers(HV)	Resistência à fadiga(MPa)	Temperatura de fusão(° C)
Liga 5052 H38	221-244	269-297	80-90	135-144	604-648
Liga 5086 H38	282-313	344-381	80-100	124-135	587-637
Liga 5251 H8	228-251	266-293	76-84	92-94	604-648
Liga 5456 H321	193-228	282-317	98-108	150-170	571-637

Tabela 15 - Algumas propriedades mecânicas bem como ponto de fusão das ligas de alumínio selecionadas [17]

### 2.3 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam apenas uma fase com estrutura cfc que se mantém numa vasta gama de temperaturas. Esta estrutura resulta do balanço de adições de elementos de liga gamagéneos, isto é, elementos estabilizadores da austenite à temperatura ambiente, com destaque para o níquel e para o carbono. O elemento de liga que distingue um aço inoxidável dos outros aços é sem dúvida o cromo, uma vez que, para ser considerado inoxidável, um aço terá de ter um teor de cromo igual ou superior a 12%; possui ainda molibdénio e por vezes cobre, titânio, nióbio e azoto, sendo este último elemento o responsável pelo aumento do patamar de cedência destes aços. Devido ao facto de os aços inoxidáveis austeníticos serem, como o nome indica, monofásicos, só podem ser endurecidos por solução sólida ou por encruamento. Estes materiais têm a capacidade de se adaptarem a condições de corrosão tanto moderadas como severas, e são usados desde temperaturas criogénicas, onde apresentam elevada tenacidade, a elevadas temperaturas nas quais exibem uma boa resistência à oxidação. Devido às suas propriedades físicas e mecânicas, estes materiais são uma classe dominante no mercado [35].

### 2.3.1 Elementos de Liga no Aço inoxidável

Como se apresentou anteriormente, os elementos de liga são um dos principais fatores de definição das propriedades de um material. Deste modo, e uma vez que serão analisadas duas ligas de aço inoxidável, no caso para os processos de conformação plástica, torna-se importante saber a influência dos elementos de liga nas mesmas, com principal relevância para os que alteram a sua resistência à corrosão. De todos os elementos que atuam na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis, o crómio é sem dúvida o mais relevante. Contudo, outros elementos, como por exemplo o níquel e o manganês, também desempenham um papel importante alterando esta propriedade nas ligas referidas.

Apresentam-se de seguida alguns elementos de liga e a sua influência nos aços inoxidáveis.

**Crómio (Cr):** O crómio é o elemento de liga característico dos aços inoxidáveis e a sua adição ao aço, além de permitir que este melhore o seu comportamento mecânico a temperaturas inferiores aos 500°C, confere um aumento significativo da sua resistência à corrosão, como se apresenta no gráfico da Figura 7. Este aumento deve-se ao facto do crómio se oxidar sob a forma de óxido de crómio ( $Cr_2O_3$ ) quando em contacto com o oxigénio, dando origem a um filme protetor. De realçar que, o crómio reduz a soldabilidade do aço [36].

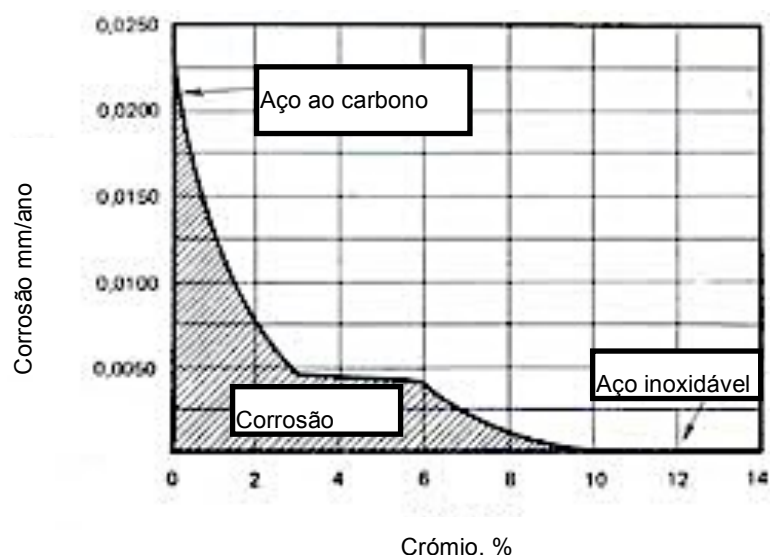


Figura 7 - Influência do Crómio na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis [37]

**Níquel (Ni):** O níquel, também este um elemento característico dos aços inoxidáveis, promove um aumento da resistência mecânica e da tenacidade, bem como da

resistência à corrosão e, à semelhança do cromo, também reduz a soldabilidade [36].

*Manganês (Mn)*: A adição de manganês ao aço tem como principal objetivo a formação de precipitados de MnS uma vez que o Mn possui maior afinidade para o enxofre do que o ferro, evitando assim a formação de FeS, que tende a precipitar nas fronteiras de grão, fragilizando o aço e reduzindo a sua resistência à corrosão. Por este motivo o manganês é considerado um elemento que melhora a resistência à corrosão bem como à fadiga, aumentando o limite elástico e a tenacidade dos aços [36].

*Carbono (C)*: A presença do carbono nos aços faz com que a temperatura de transição destes seja alterada, originando um aumento da resistência mecânica, por exemplo ao nível da dureza. No entanto, também é responsável pela redução da ductilidade, tenacidade e soldabilidade [38].

*Silício (Si)*: A adição de silício permite essencialmente eliminar o oxigênio que se encontra em solução no aço, evitando assim a formação de óxidos indesejáveis [38].

*Enxofre (S)*: O enxofre, quando adicionado em pequenas quantidades, melhora as características de maquinagem do aço inoxidável. Tem grande afinidade com o Fe, formando precipitados de FeS, que se depositam nas fronteiras de grão, fragilizando o aço. Este problema pode ser evitado se a presença de manganês for suficiente para fazer com que este se ligue ao enxofre, formando precipitados de MnS, ao invés de FeS [38].

*Azoto (N)*: A adição de azoto ao aço inoxidável promove a estabilidade da fase austenítica. Promove ainda a elevação da tensão de cedência quando adicionado a aços inoxidáveis austeníticos. Por outro lado, este também aumenta o valor da temperatura de transição dúctil-frágil [38].

*Molibdênio (Mo)*: A adição de molibdênio ao aço inoxidável tem o propósito de incrementar a resistência à corrosão do mesmo [39].

## 2.3.2 Conformação plástica

### 2.3.2.1 Principais aços inoxidáveis propostos para conformação plástica

Uma vez que a empresa STA também processa aço inoxidável, apresentam-se de seguida duas ligas de aço inoxidável austenítico, da série 300, passíveis de serem processadas por conformação plástica.

O aço inoxidável austenítico de baixo carbono, AISI 304 LN, possui excelentes características de resistência à corrosão em geral, inclusive intergranular, bem como uma boa resistência mecânica e boa soldabilidade. É muito usado em aplicações de arquitetura e na construção civil devido à sua excelente resistência mecânica e boa aparência estética. A sua composição química é apresentada na Tabela 16 [17, 40].

Fe(%)	Cr(%)	Ni(%)	Mn(%)	N (%)	Si(%)	P(%)	C(%)	S(%)
65,7-74,4	17-19,5	8,5-11,5	0,2	0,12-0,22	0,1	0-0,045	0-0,03	0-0,015

Tabela 16 - Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 304 LN (% peso) [17]

O segundo aço da série é o AISI 316 LN. Embora muito semelhante ao AISI 304 LN, as suas propriedades são ligeiramente superiores devido ao facto de possuir um teor de níquel mais elevado e apresentar molibdénio na sua composição química, como se apresenta na Tabela 17, o que melhora as propriedades mecânicas e aumenta a resistência à corrosão. Este aço possui um teor de carbono inferior ao do AISI 304 LN, evitando assim a precipitação de carbonetos durante a soldadura. As suas aplicações são bastante vastas, podendo ir desde a indústria química à naval pois apresenta uma boa resistência à corrosão em geral e/ou localizada, em vários ambientes, inclusive o marítimo, ao qual pode ficar exposto sem apresentar problemas de corrosão [17, 40].

Fe(%)	Cr(%)	Ni(%)	Mn(%)	N (%)	Si(%)	P(%)	C(%)	S(%)	Mo
61,2-71,4	16,5-18,5	10-12	0,2	0,12-0,22	0,1	0-0,045	0-0,03	0-0,015	2-3

Tabela 17 - Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 316LN (% peso) [17]

### 2.3.2.2 Análise comparativa entre os aços inoxidáveis para conformação plástica

Comparando os dois aços inoxidáveis apresentados, conclui-se que o AISI 316LN apresenta propriedades mecânicas superiores, como se apresenta na Tabela 18. Ao nível da resistência à corrosão, o AISI 316LN também é um pouco superior, devido à sua composição química. De acordo com a Figura 8, os aços inoxidáveis austeníticos da família 316 são indicados para aplicações em ambientes marítimos. Contudo, estes são significativamente mais caros, uma vez que o preço do AISI 316 LN é aproximadamente 1,29 vezes superior ao do AISI 304 LN, pelo que, dependendo da aplicação, pode ou não justificar-se o investimento [17, 40].

Ligas	Tensão convencional de proporcionalidade a 0,2%(MPa)	Resistência à tração(MPa)	Dureza Vickers(HV)	Resistência à fadiga(MPa)	Temperadtura de fusão(° C)
AISI 304 LN	270-290	550-750	195-217	277-306	1398-1448
AISI 316LN	280-300	580-780	214-237	290-321	1376-1396

Tabela 18 - Algumas propriedades mecânicas bem como ponto de fusão dos aços inoxidáveis seleccionados [17]

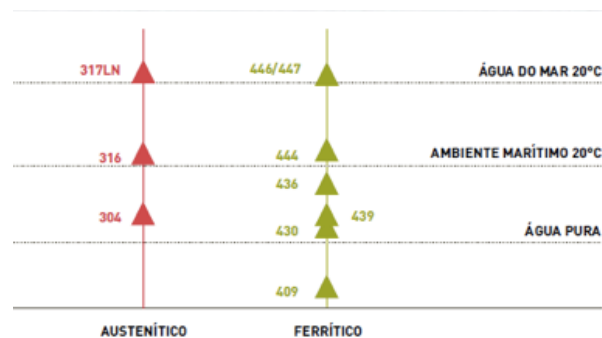


Figura 8 - Aços inoxidáveis mais apropriados para aplicações em água pura, ambiente marítimo 20°C e água do mar a 20°C

## 2.4 Processos de Proteção de Superfície

Embora existam materiais com capacidade para resistir a ambientes corrosivos sem qualquer tipo de proteção, outros há em que tal não acontece. Deste modo, o tema da proteção de superfícies revela-se muito importante uma vez que permite melhorar as propriedades dos materiais, tornando-os mais aptos às diversas

aplicações. Contudo, a proteção de superfícies não é necessariamente concorrente à substituição dos materiais uma vez que, para obter excelentes resultados de resistência à corrosão, pode-se substituir o material e ainda aplicar algum tipo de proteção.

De acordo com a bibliografia, a anodização, a pintura, a cromatização e o PVD são alguns dos métodos de proteção de superfície mais eficazes contra a corrosão. Assim sendo, estes serão os métodos de proteção de superfície abordados neste tópico, sendo que a anodização e a pintura são os mais utilizados pela STA para o revestimento das suas peças [7].

#### 2.4.1 Anodização

A anodização é um processo onde um metal, ligado ao polo positivo de um circuito elétrico, é mergulhado num banho eletrolítico passando a ser o ânodo de um sistema, que também engloba a cuba eletrolítica, com o objetivo de criar um filme de óxido na superfície do mesmo. No caso das ligas de alumínio, este processo permite transformar o alumínio em óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que forma uma camada protetora à superfície da peça, aumentando a sua resistência à corrosão. Existem vários tipos de anodização que diferem entre si dependendo do tipo de ácido que é utilizado no banho. Deste modo, temos dois grandes grupos: a anodização num banho com óxido de crómio ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), e a anodização em ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Dentro da anodização em ácido sulfúrico existem duas variantes: uma realizada à temperatura ambiente, revestimento convencional (*conventional anodizing*), e outra a baixa temperatura, revestimento duro (*hardcoat anodizing*). Neste trabalho descreve-se a anodização em ácido sulfúrico à temperatura ambiente uma vez que é o processo usado na STA [41, 42].

A anodização em ácido sulfúrico produz normalmente uma camada protetora com uma espessura mínima de 8  $\mu\text{m}$ . Através deste processo é ainda possível aplicar uma grande variedade de cores à camada anodizada. Neste método de anodização, 2/3 da espessura da camada anodizada forma-se para o interior da peça sendo que o restante representa a sobrecamada. Este tipo de tratamento é indicado para proteger peças que se destinem a ambientes corrosivos, como por exemplo o marítimo, uma vez que, de todas as anodizações, é a que oferece melhores características de proteção contra a corrosão [7, 41, 42].

#### 2.4.1.1 Vantagens e desvantagens da anodização

A aplicação deste processo oferece várias vantagens além da boa resistência à corrosão. Em primeiro lugar, a anodização à temperatura ambiente (<18°C) oferece um excelente acabamento superficial, possibilitando a aplicação deste processo a peças onde o acabamento superficial e a aparência estética sejam muito importantes. Permite ainda a obtenção de peças em várias cores. Em segundo lugar, este tratamento produz uma superfície com boa resistência ao desgaste, o que permite que as peças tratadas por este processo sejam usadas por exemplo em perfis deslizantes. Contudo, este processo também apresenta algumas limitações, definidas pela composição química das ligas em que é aplicado. Embora possa ser utilizado para a maioria das ligas de alumínio, a utilidade deste processo, em ligas cujo teor de Si e/ou Cu é muito elevada, é um pouco limitada, sendo que 7% de silício e 5% de Cu nas ligas de alumínio são valores limite para a aplicabilidade do mesmo. Contudo, independentemente da quantidade de Si ou Cu, a liga é anodizável, embora, nestes casos, não apresente um bom aspecto visual. Isto é, como o objetivo da anodização é a criação de uma camada de alumina ( $Al_2O_3$ ), a presença de elementos como o silício ou o cobre irão influenciar negativamente a formação dessa camada, não permitindo que esta se forme de uma maneira homogênea. O nível de resistência à corrosão depende em grande parte da espessura da camada anodizada, existindo uma gama de espessuras ideal para assegurar uma boa resistência à corrosão, mesmo em ambientes muito severos. Esta gama de valores encontra-se entre os 15 e os 30  $\mu m$ , como se apresenta no gráfico da Figura 9. Além disto, a norma QUALANOD, *Quality Label for Sulphuric Acid-Based Anodizing of Aluminium*, estabelece várias classes para as espessuras de anodização: as classes 5, 10, 15, 20 e 25 para as espessuras de 5  $\mu m$ , 10  $\mu m$ , 15  $\mu m$ , 20  $\mu m$  e 25  $\mu m$ , respetivamente. Para peças que estão em contato direto com a envolvente a norma sugere a aplicação de uma camada com uma espessura mínima de 15  $\mu m$ , para garantir um bom acabamento superficial. Independentemente disto, alguns clientes não têm como objetivo a obtenção de peças com excelente acabamento, estando mais preocupados em assegurar boa proteção contra a corrosão das mesmas. Assim, deverá ser o cliente a informar a entidade que efetua o tratamento se pretende um produto com excelente aspecto visual ou apenas com boa resistência à corrosão [7, 41, 42, 43].

Em relação às ligas apresentadas no presente trabalho, este tratamento aplica-se a todas as ligas de alumínio para conformação plástica. Quanto às ligas de fundição, tanto injetada como por gravidade, este processo só se aplica às ligas de alumínio  $AlSi_7$  e  $AlSi_5$  uma vez que as outras apresentam teores muito elevados de Si, o que não permite a anodização com excelente aspeto visual, como desejado. O mesmo se aplica às ligas processadas pela STA, sendo apenas possível efetuar o tratamento de anodização sobre as ligas de fundição por gravidade [44].

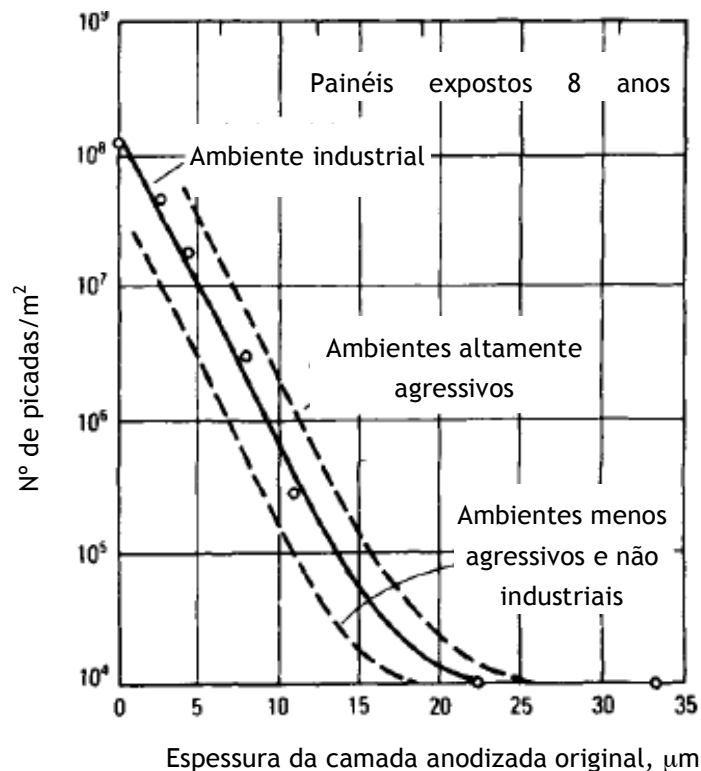


Figura 9- Influência da espessura da camada anodizada na resistência à corrosão em três ambientes diferentes, ao final de oito anos, em ligas de alumínio [41]

#### 2.4.2 Pintura

A pintura encontra-se entre os tipos de proteção de superfície mais usados na indústria. As pinturas atuam como camadas protetoras que isolam o metal base do ambiente onde este se encontra, melhorando assim a sua durabilidade. Neste sector devem destacar-se os revestimentos em pó que, entre outras proveniências, podem ter origem na família das resinas *epoxy* e *polyester*, e podem ser aplicados sobre o metal de várias maneiras, como por exemplo por deposição electrostática ou aplicação direta da tinta [41, 45].

A pintura que utiliza tintas em pó é constituída por vários componentes: o ligante, os pigmentos, as cargas e os aditivos. O ligante é uma mistura de resinas e endurecedores que formam uma massa homogénea que constituirá o aglutinante da pintura. Os pigmentos são o componente responsável por conferir cor à tinta, como por exemplo o branco, através dos óxidos de titânio, e o vermelho através dos óxidos de ferro. As cargas são produtos inorgânicos cujo objetivo é melhorar as características mecânicas e as propriedades anticorrosivas da tinta. Finalmente, os aditivos têm a função de melhorar a resistência química, a resistência aos UV e à temperatura e melhorar as propriedades físicas do pó. O componente determinante na definição das características de resistência da tinta é o ligante [41, 45, 46].

Assim, a escolha dos componentes para a tinta deve ser feita de acordo com o ambiente em que a peça irá funcionar. Na Tabela 19 apresentam-se alguns tipos de revestimentos, organizados segundo as aplicações onde estes apresentam melhores resultados [41].

Revestimentos	Aplicações
<b>Exposição ao exterior</b>	
Tintas a óleo	Construções, veículos, pontes, manutenção
Resinas alquídicas	Pinturas de acabamento em metais e outros produtos
Resinas acrílicas	Acabamentos em automóveis
<b>Atmosferas marítimas</b>	
Resinas epoxy	Superestruturas e instalações junto à costa
Resinas alquídicas	
Resinas fenólicas	
<b>Imersão em água</b>	
Resinas epoxy	Cascos de navios e estruturas marítimas
Resinas fenólicas	Casco de navios
Resinas de vinil	Casco de navios e fechaduras
<b>Vapores químicos</b>	
Resinas epoxy	Equipamentos de processamento de químicos
Resinas de vinil	
<b>Luz solar extrema</b>	
Resinas de vinil	Estruturas metálicas de toldos
Resinas acrílicas	Acabamentos em automóveis
Resinas de silicone alquídicas	Equipamentos da indústria petrolífera
<b>Humidade extrema</b>	
Resinas epoxy	Ar condicionado
Resinas fenólicas	Indústria química e de papel
<b>Altas temperaturas</b>	
Resinas epoxy	Motores, canalizações (T < 120 °C)
Silicone	Partes de fogão (T < 290 °C)

Tabela 19 - Revestimentos orgânicos mais adequados para resistência à corrosão em diversas aplicações [41]

Como se apresenta na Tabela 19, as resinas de vinil, a par das resinas epoxy, podem ser classificadas como resistentes à corrosão em grande parte dos ambientes corrosivos [41, 45, 47].

### 2.4.2.1 Vantagens e Desvantagens da pintura

Este tipo de revestimento apresenta a vantagem de poder ser aplicado a qualquer liga. Na Tabela 20 apresentam-se vários tipos de revestimentos, expondo as suas vantagens e desvantagens.

Resina	Formas disponíveis	Método de secagem	Vantagens	Desvantagens	Custo	Aplicações
Acrílica	Solvente, aquoso, pó	Ao ar, no forno	Durabilidade no exterior, resistência química e à temperatura	Fraca adesão, tendência a fragilizar	Moderado-alto	Acabamentos automóveis, revestimento de alumínio, indústria em geral
Alquídica	Solvente, aquoso	Ao ar, no forno	Alto brilho, flexibilidade, boa durabilidade, versatilidade	Tendência a ficar amarelo, baixa resistência alcalina	Baixo-moderado	Esmaltes comerciais, acabamentos de pintura, acabamento metal
<i>Epoxy</i>	Solvente, aquoso, pó	Ao ar, no forno	Excelente adesão, resistência química, flexibilidade, resistência à abrasão, dureza	Risca com relativa facilidade, baixa resistência a ácidos oxidantes	Moderado-alto	Pinturas de manutenção, acabamentos automóveis, produtos metálicos
Fenólica	Solvente, aquoso	Ao ar, no forno	Dureza, adesão, resistência química	Escurece; só pode ser usada em acabamentos escuros	Alto	Pintura de manutenção em metais
<i>Polyester</i>	Solvente, aquoso, pó	Ao ar, no forno	Alto brilho, dureza, resistência química	Adesão intermédia	Alto	Acabamentos em madeira, acabamentos de fornos
Silicone	Solvente, aquoso	Ao ar, no forno	Alta resistência à temperatura, durabilidade no exterior, mantém o brilho e a cor	Tendência a fragilizar; alguns silicões requerem altas temperaturas de secagem no forno	Alto	Qualquer acabamento onde se exige resistência à temperatura
Vinil	Solvente, pó	Ao ar, no forno	Resistência química, flexibilidade, rápida a secar ao ar, resistente à abrasão	Baixo ponto de inflamação	Moderado	Pinturas de manutenção, decoração de metais

Tabela 20 - Características de vários tipos de revestimentos e suas vantagens e desvantagens, bem como principais aplicações [41]

Os pós *epoxy* e *polyester* apresentam boa resistência química, adesão e durabilidade, inclusive em ambientes marítimos. No entanto, através da Tabela 21, é possível verificar que, quando o campo de utilização se refere a aplicações de exterior, os pós de *polyester* são os mais indicados, ao contrário do que acontece em aplicações de interior, onde é possível aplicar vários tipos de pós. Esta situação pode ser comprovada através da análise da Tabela 22 onde se observa que, embora as pinturas com resina *epoxy* possuam características superiores à com resina *polyester* na maioria dos campos, inclusive na resistência à corrosão, a sua resistência à intempérie é muito baixa, podendo estas sofrer uma alteração das suas propriedades quando sujeitos, por exemplo, à chuva e ao sol. Deste modo é possível afirmar que as resinas *epoxy* e *polyester* são as mais indicadas para aplicar em metais que, durante o seu tempo de serviço, estejam sujeitos a ambientes severos ao nível da corrosão, como o marítimo, ressalvando o facto de a resina *polyester* possuir um desempenho melhor em ambientes mais agressivos. Outra alternativa pode ser a utilização de pós constituídos por uma mistura de *epoxy* e *polyester* [48, 49, 50].

	Tipo de aplicação	Campo de utilização	Família de pó
Pós decorativos	Interior	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mobiliário metálico</li> <li>• Estruturas metálicas</li> <li>• Aquecedores</li> <li>• Acessórios automóveis</li> <li>• Ferramentas</li> <li>• Eletrodomésticos</li> <li>• Maquinaria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Epoxy</i></li> <li>• <i>Epoxy-Polyester</i></li> <li>• <i>Polyester</i></li> <li>• Poliuretanos</li> </ul>
	Exterior	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estruturas metálicas (Ex.: Painéis, perfis , caixilharias)</li> <li>• Equipamentos para exterior (Ex.: Arcas frigoríficas)</li> <li>• Mobiliário de jardim</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Polyester</i></li> </ul>

Tabela 21 - Tipo de pó a utilizar em função da sua aplicação [50]

Propriedades	<i>Epoxy</i>	<i>Epoxy-Polyester</i>	<i>Poliéster</i>
Dureza	+++	++	++
Flexibilidade	+++	+++	+++
Resistência à temperatura	-/0	++	+++
Resistência à corrosão	+++	++	++
Resistência à intempérie	-	-	+++
Resistência a produtos químicos	+++/**	+++/**	++

Tabela 22 - Comparação entre *Epoxy*, *Epoxy-Polyester* e *Polyester* segundo algumas propriedades (+++ Excelente; ++ Muito bom; + Bom; 0 Aceitável; - Mau) [50]

### 2.4.3 Cromatização

A cromatização é um processo muito utilizado na indústria, tanto para efeitos de decoração como de revestimento de peças que irão estar expostas a ambientes agressivos. Este revestimento é realizado através de um tratamento químico ou eletroquímico sobre metais em soluções de iões cromato contendo crómio hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ). Como resultado desta ação surge uma camada de proteção composta pelo substrato, componentes complexos de crómio (cromatos metálicos), assim como de outros iões provenientes do banho. O principal objetivo deste revestimento é alcançar uma maior resistência à corrosão; contudo, também pode ser utilizado para melhorar a adesão de outros revestimentos, como por exemplo a pintura, ou apenas com um objetivo decorativo. Este tipo de revestimento oferece uma excelente proteção contra a corrosão ao metal em qualquer tipo de ambiente, seja ele rural, industrial, no interior ou no litoral (ambientes marítimos). O nível de proteção depende de vários fatores, nomeadamente o metal base onde é aplicado, o tipo de cromato utilizado e a quantidade de crómio existente no revestimento. Em componentes que não são pintados, quanto maior for a quantidade de matéria aplicada melhor é a qualidade do revestimento, sendo que os limites são impostos pelas restrições do processo, ou pelos requisitos de cor. Por outro lado, o nível de proteção aumenta substancialmente quando se aplica este revestimento em peças que vão ser pintadas [41].

Também neste caso a resistência à corrosão aumenta com a espessura do filme protetor que é aplicado, podendo este variar ente 0,01 e 0,1  $\mu\text{m}$ . As cores passíveis de reproduzir com este revestimento também variam com a espessura, sendo possível obter revestimentos incolores, azuis, amarelos, verdes, verde-oliva e iridescente. As cores mais escuras correspondem aos filmes de maior espessura,

sendo que estas possuem maior percentagem de cromatos. O ideal será aliar este revestimento a um metal que já possua boas características de resistência à corrosão pois o resultado obtido será muito melhor. De acordo com os dados da Tabela 23, é possível comprovar que a resistência à corrosão é superior nas cores mais escuras. Além disso, é de notar que, com este revestimento, é possível obter excelentes resultados de resistência à corrosão; por exemplo, a liga de alumínio 3003, com o cromado amarelo acastanhado, apresenta uma resistência à corrosão até 800 horas como se observa na Tabela 23, obtida na bibliografia [41].

Material	Tipo de revestimento cromado	Tempo até ao aparecimento da primeira mancha de corrosão (h)
Alumínio 3003	Não tratado	<24
	Limpo/polido	60-120
	Amarelo acastanhado	250-800

Tabela 23 - Dados recolhidos da bibliografia sobre os ensaios realizados em câmara de nevoeiro salino com a liga de alumínio 3003 [41]

#### 2.4.3.1 Vantagens e Desvantagens da cromatização

Como se referiu anteriormente, através da cromatização é possível obter excelentes resultados em termos de resistência à corrosão. Por conseguinte, a aplicabilidade deste revestimento prende-se apenas com os custos envolvidos no mesmo, e com o problema de manipulação de substâncias perigosas e cuja descarga carece de tratamento de efluentes específico.

#### 2.4.4 PVD

O PVD (*Physical Vapor Deposition*) é um tipo de proteção de superfície que tanto pode ser utilizado com o objetivo de proteger o material onde é aplicado como ter apenas um objetivo estético. De forma resumida, é um processo em que o material de proteção sofre uma sublimação seguida de condensação, sob a forma de um filme, na superfície do metal a proteger. Este processo permite a deposição de metais de elevada pureza, ligas metálicas ou vários compostos cerâmicos (nitretos, óxidos e carbonetos), permitindo criar produtos praticamente isentos de defeitos uma vez que as temperaturas atingidas pelo substrato são relativamente baixas, até um máximo de 500°C. É um processo aplicável a praticamente todos os tipos de metais ou plásticos, quer estes assumam o papel de substratos ou revestimentos, embora a temperatura possa ser uma limitação na deposição em alguns plásticos.

Dependendo da energia utilizada no processo, este pode dividir-se em dois grandes grupos: os que utilizam energia térmica, onde se distingue a deposição iónica (*ion plating*) e os que utilizam energia mecânica, como a técnica de projeção catódica, também conhecida como *sputtering*. Esta última é uma das técnicas mais utilizadas para a realização deste processo e caracteriza-se pela projeção catódica de átomos de um alvo, sujeito a um potencial negativo elevado, de 1 a 5 kV, para um substrato (peça a proteger), colocado face-a-face com o mesmo. O alvo é bombardeado por iões, de um gás inerte e ionizável introduzido na câmara, normalmente árgon, acelerados por uma diferença de potencial entre o alvo e o substrato. Os átomos atravessam a câmara de deposição, depositando-se sobre a superfície do substrato, dando origem ao filme protetor pretendido, como se apresenta na Figura 10.

A deposição iónica tem como objetivo melhor a adesão do revestimento ao substrato e aumentar a velocidade de deposição. Neste processo, o substrato está submetido a um potencial muito negativo, entre 2 a 5 kV, que atrai os iões positivos e os átomos neutros introduzidos pelo gás inerte e pelo canhão de eletrões, que o funde permitindo a sua evaporação (ver Figura 11) [51, 52, 53, 54].

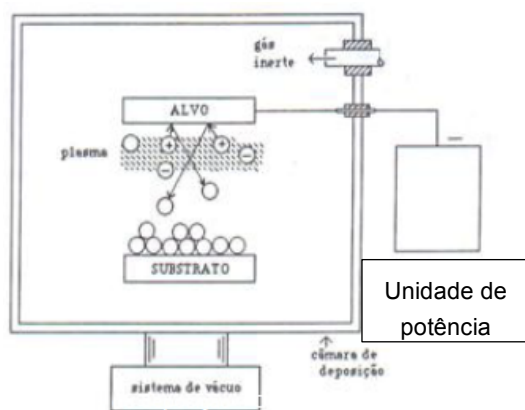


Figura 10 - Esquema ilustrativo do processo PVD por *sputtering* [53]

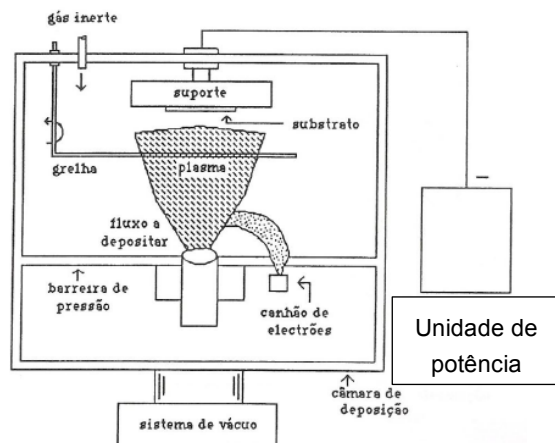


Figura 11 - Esquema ilustrativo do processo PVD por deposição iónica [53]

#### 2.4.4.1 Vantagens e desvantagens do PVD

A aplicabilidade deste processo é algo bastante positivo, podendo utilizar-se qualquer tipo de revestimento inorgânico e alguns orgânicos sobre quase todos os tipos de substratos. Adicionalmente, o PVD permite obter revestimentos mais duros

e mais resistentes à corrosão, bem como mais “amigos do ambiente”, do que outros processos, como por exemplo a eletrodeposição. Por outro lado, a escolha da tecnologia de PVD apropriada a cada aplicação requer algum conhecimento e experiência, sendo um processo dispendioso. Entre o *sputtering* e a deposição iónica é possível referir que a segunda possui um poder de penetração no substrato superior, bem como uma melhor adesão, como se apresenta na Tabela 24; no entanto, através do *sputtering* é possível obter um revestimento mais uniforme [51, 52, 53].

	<i>Sputtering</i>	Deposição iónica
Fonte de alimentação	Ejeção de átomos (T <sup>a</sup> Baixa)	Canhão de Eletrões (T <sup>a</sup> Elevada)
Atmosfera	Árgon	Árgon
Pressão (Pa)	13,3×10 <sup>-2</sup> a 13,3	13,3×10 <sup>-2</sup> a 13,3
Velocidade de deposição (µm/h)	0,25 a 250	5 a 1500
Adesão do revestimento	Boa	Excelente
Poder de penetração	Bom	Excelente

Tabela 24 - Quadro resumo das principais diferenças, em termos de condições de processamento, entre os processos de *sputtering* e deposição iónica [53]

## 2.5 Anodização de Ligas de Fundição Injetada

Um dos problemas enfrentados pela STA prende-se com o facto desta não conseguir anodizar peças de alumínio produzidas por fundição injetada. Esta parte do trabalho foca-se na procura de soluções que permitam a resolução desta situação uma vez que os níveis de produção poderiam aumentar drasticamente se isso se tornasse uma realidade. Atualmente apenas são anodizadas peças de alumínio provenientes da fundição por gravidade que, como já foi referido, é um processo muito dependente do trabalho humano, não sendo automatizado e, conseqüentemente, com uma produtividade muito inferior à da fundição injetada. A anodização é um método que pode ser aplicado em quase todas as ligas de alumínio; contudo, é possível obter melhores resultados em ligas com baixo teor de elementos de liga. Deste modo existe um valor limite para o teor, por exemplo, do silício ou de cobre, sendo este de 7% e 5%, respetivamente. Uma vez que a adição de silício, às ligas de alumínio de fundição, promove um aumento da sua fluidez, como se observa na Figura 12, surge desde logo um problema de incompatibilidade entre as ligas usadas para anodização, que impõe a utilização de ligas com baixo teor de silício, e as ligas para fundição injetada utilizadas na empresa, que

possuem alto teor de silício, como por exemplo a liga  $AlSi_{10}Mg$ , com 10% deste elemento [55].

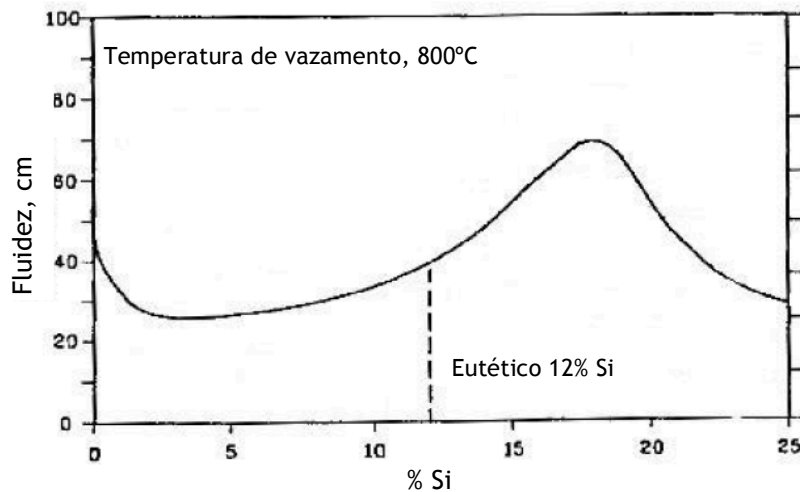


Figura 12 - Efeito do teor de silício sobre a fluidez das ligas do sistema binário Al-Si [55]

Com o objetivo de encontrar uma solução para esta situação foram abordadas três possibilidades:

1. A utilização de uma liga diferente das utilizadas na STA;
2. A aplicação de um tratamento térmico;
3. A deposição de uma camada de alumínio de elevada pureza, anodizável, por PVD.

1. Uma vez que as ligas de alumínio utilizadas na fundição injetada pela STA possuem um teor de silício demasiado alto para permitir a sua anodização, a primeira possibilidade estudada foi a utilização de uma liga de alumínio diferente. Esta liga deveria possuir o teor de silício dentro dos valores exigidos, para obter um bom aspeto visual, pelo processo de anodização e ainda assim possuir silício suficiente para conferir a fluidez necessária para que a liga pudesse ser processada por fundição injetada. Com base na revisão bibliográfica realizada na segunda secção deste trabalho, onde se abordam as ligas de fundição injetada (ver secção 2.2.2, página 10), seria possível utilizar duas das quatro ligas apresentadas: a liga de alumínio  $AlSi_7$ , com 7% Si, e a liga de alumínio  $AlSi_5$ , com 5%. Contudo, devido ao facto de não se ter conseguido ter acesso no mercado à segunda liga (por ausência de fornecedores), foi apenas utilizada a primeira. De acordo com a Tabela 2

(página 11), onde se apresenta a composição química da liga AlSi<sub>7</sub>, esta possui um teor em cobre bastante inferior ao limite máximo imposto pela anodização e um teor em silício que se encontra no limite, tornando esta opção à partida válida para a anodização.

2. Como já foi referido, a presença de outros elementos além do alumínio, no caso o silício, não favorece a formação de uma camada de alumina homogénea que se pretende criar na anodização. Assim, uma alternativa para tentar anodizar as ligas provenientes da fundição injetada seria a redução do tamanho de grão de silício. Para isto é necessário realizar um tratamento térmico adequado à redução do tamanho de grão para a liga em causa. A liga escolhida para realizar esse tratamento foi a liga de alumínio A356.0/AlSi<sub>7</sub>, e o tratamento adotado foi o T6, segundo o qual a peça deve fazer um estágio de 12 horas à temperatura de 540°C, seguido de têmpera em água e novo estágio, entre 3 a 5 horas, a 155°C e por fim arrefecimento ao ar, até à temperatura ambiente, como esquematizado na Tabela 25 [12].

Liga	Tratamento	Tratamento de solubilização		Tratamento de envelhecimento	
		Temperatura (°C)	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Tempo (h)
Alumínio 356.0	T6	540	12	155	3-5

Tabela 25 - Sequência do tratamento térmico T6 para a liga de alumínio 356.0 [12]

3. Após pesquisa, foi encontrada outra possível solução para responder ao problema colocado passa pela deposição de uma camada de alumínio puro, por PVD, sobre a peça que se pretende anodizar uma vez que o alumínio puro é facilmente anodizável. Na Figura 13 apresenta-se um exemplo, recolhido na bibliografia, da aplicação desta técnica. Note-se que sobre a peça base, em alumínio AlMg<sub>9</sub>, não anodizável, foi depositada uma camada com cerca de 25 µm de alumínio puro, o que permitiu a anodização [56]. Assim, ao aplicar este processo nas ligas de fundição injetada da STA, é espectável que seja possível anodizar as mesmas.

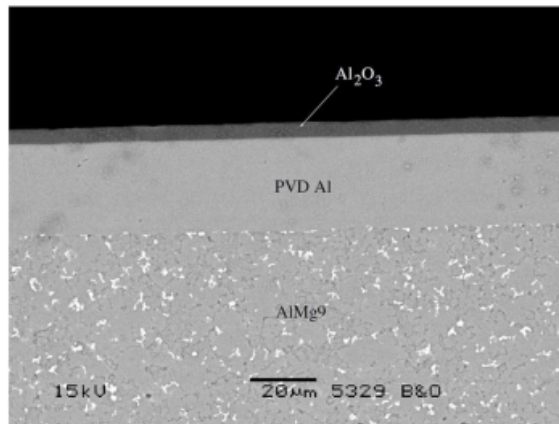


Figura 13 - Imagem obtida em microscopia MEV da deposição de uma camada de Al puro sobre a liga AlMg<sub>0</sub> e respectiva camada anodizada [56]



### 3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Na sequência do trabalho de pesquisa realizado foi necessário proceder à experimentação das várias soluções apresentadas. Uma vez que este trabalho tinha como objetivo o estudo de duas situações distintas: a criação de uma nova linha de produto com boas características de resistência à corrosão, e a possibilidade de anodizar peças de alumínio produzidas por fundição injetada, esta secção divide-se em três fases:

- *1ª fase*: seleção de diferentes ligas, testando-as em comparação com as ligas que são atualmente utilizadas pela STA. Estes ensaios também têm o objetivo de testar os processos de revestimento utilizados na empresa, como a pintura e a anodização.
- *2ª fase*: tentativa de anodização de ligas para fundição injetada, promovendo o teste das diferentes soluções apresentadas com o objetivo de viabilizar este processo.
- *3ª fase*: testes em câmara de nevoeiro salino, que visam avaliar a resistência à corrosão de todas as opções apresentadas anteriormente.

#### 3.1 Seleção das ligas

Para responder ao primeiro problema colocado (criação de uma nova linha de produto com excelente resistência à corrosão) foi necessário procurar novas ligas de alumínio alternativas às já utilizadas na STA. Após a seleção, as novas ligas deveriam ser preparadas nas mesmas condições que as ligas da STA e testadas em simultâneo. As ligas de alumínio selecionadas como alternativa às processadas na STA foram a liga de alumínio A356.0 ou AlSi<sub>7</sub>, a liga A413.2 ou AlSi<sub>12</sub>, a S360.0 ou AlSi<sub>12</sub>Mg e a liga de alumínio S443.0 ou AlSi<sub>5</sub>, apresentadas anteriormente na secção 2.2.2.1. Destas quatro possibilidades apenas a liga de alumínio AlSi<sub>7</sub> foi selecionada uma vez que as restantes não estavam disponíveis no mercado.

Em relação ao aço inoxidável, e em conformidade com o apresentado na parte teórica (secção 2.2.4.1), foi selecionado o aço inoxidável 316 LN como alternativa ao aço inoxidável 304, utilizado pela STA.

Assim, as ligas selecionadas para testar são apresentadas na Tabela 26.

Ligas de alumínio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AlSi<sub>7</sub></li> <li>• AlSi<sub>10</sub></li> <li>• Am3ST</li> <li>• Ag4Z</li> </ul>
Aços inoxidáveis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AISI 316 LN</li> <li>• AISI 304</li> </ul>

Tabela 26 - Ligas selecionadas para o estudo

Com esta seleção é possível analisar e comparar todas as opções, desde as ligas sugeridas como alternativa, até às utilizadas na STA. Todas as amostras das ligas de alumínio foram fornecidas na forma de lingotes, enquanto que as amostras de aço inoxidável foram fornecidas sob a forma de uma barra.

### 3.1.1 Preparação das amostras

Para a realização dos testes é muito importante garantir a semelhança geométrica das amostras.

Inicialmente optou-se por vazar amostras idênticas ao puxador apresentado na Figura 14.



Figura 14 - Imagem representativa do puxador utilizado

Para conferir às amostras o formato do puxador foi necessário fundir os lingotes e vazar o metal para a moldação fornecida pela STA, que se apresentada na Figura 15. A fusão das ligas e respetivo vazamento foram realizados no Centro de Formação Profissional da Indústria de Fundição (CINFU).



Figura 15 - Coquilha utilizada no vazamento das várias ligas de alumínio

As várias ligas foram fundidas em forno de cadinho aquecido a gás, como se apresenta na Figura 16 e posteriormente vazadas à temperatura de 750°C (ver Figura 17). Para facilitar a desmoldação das peças, impedindo que estas se partissem, foram aplicados dois Daycotes (desmoldantes) diferentes, um para a parte do gito (Daycote D39) e outro para a parte da peça (Daycote Ks201).



Figura 16 - Fusão do alumínio em forno de cadinho aquecido a gás



Figura 17 - Vazamento manual do alumínio a 750°C para a coquilha

Contudo, não foi possível reproduzir integralmente o sistema de vazamento da STA, onde as temperaturas, tanto da moldação como do alumínio fundido, se mantêm constantes ao longo do processo. Após o vazamento notou-se que algumas peças apresentavam defeitos à superfície. A existência deste defeitos poderia indicar falhas de enchimento que poderiam estender-se para o seu interior. Assim, todas as peças foram observadas em raios-X, com o objetivo de verificar a sua sanidade interna. Esta análise foi realizada nas instalações do CINFU com o equipamento de inspeção de raios-X InnospeXion Aps. Os exames confirmaram que as peças apresentavam porosidade no seu interior, como o exemplo que se apresenta na Figura 18.

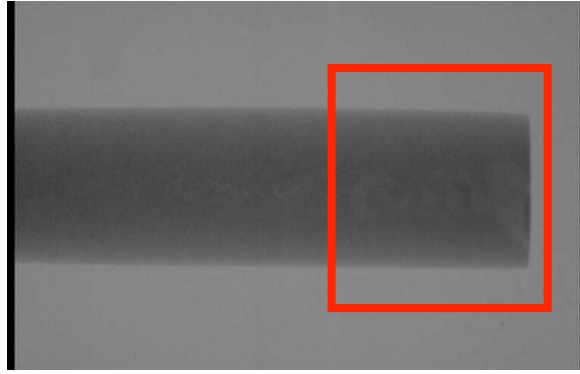


Figura 18 - Radiografia de uma das peças que apresentou defeitos (assinalados pelo quadrado)

Para evitar testar peças com defeitos, foi decidido cortar as amostras ficando apenas com a parte que não possuísse defeitos, uma vez que a qualidade superficial destas é o fator mais importante, e mantendo a igualdade geométrica. Assim os puxadores foram cortados obtendo-se amostras semelhantes à apresentada no exemplo da Figura 19.

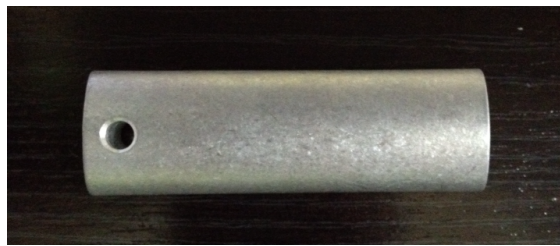


Figura 19 - Imagem de uma das amostra cortadas após observação dos defeitos por raios-X

Uma vez que um dos objetivos do trabalho também é o de testar dois tipos de revestimentos diferentes utilizados na STA, foi necessário preparar superficialmente as amostras de acordo com o revestimento a que iriam ser sujeitas. Assim, as amostras que iriam ser anodizadas sofreram esmerilagem, passando por lixas de diferentes granulometrias (180 a 600 mesh), sendo de seguida polidas, ficando com uma superfície adequada para anodizar. As amostras destinadas à pintura passaram pelo mesmo processo de esmerilagem que as amostras de anodização, com a diferença de que, no final da esmerilagem, sofreram um tratamento de limpeza por vibração, no qual foram colocadas em contato com pequenos cones abrasivos durante cerca de 40 min, para criar uma superfície ideal para a adesão da tinta.

### 3.1.1.1 Anodização

Para a anodização foram selecionadas quatro amostras, uma por cada liga de alumínio. Todas as amostras passaram pela mesma sequência de anodização, que se apresenta na Tabela 27.

Sequência de processos	Tempos/Temperaturas
Carga	
Desengorduramento (45-60 g/L de Almeco Clean18)	8 min/55-70°C
Lavagem	1 min
Setinagem (15 g/L de Almeco46 e 60-70g/L NaOH)	20 min
Lavagem	1 min
Neutralização (180 a 220 g/L de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> e 15-20 g/L de SurTec498)	1 min
Lavagem	1 min
Anodização (180 a 220 g/L de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	40 min/<18°C
Lavagem (3 vezes)	1 min
Colmatação	40 min/>98°C
Lavagem	1 min
Descarga	(Total 112 min)

Tabela 27 - Sequência das etapas de anodização utilizada na STA

A realização deste tratamento teve por objetivo avaliar a resistência à corrosão do mesmo, após testes em câmara de nevoeiro salino e, ao mesmo tempo, verificar a possibilidade de anodizar ligas de fundição injetada.

### 3.1.1.2 Pintura

O tratamento de pintura teve por objetivo analisar a resistência à corrosão de algumas das tintas mais utilizadas na STA. Para isso selecionaram-se aleatoriamente duas amostras nas quais se aplicaram as duas tintas mais utilizadas na empresa para revestir as suas peças. Deste modo, foi decidido aplicar a tinta preta Pó RAL 9505 *polyester* (Figura 20), e a tinta cinzenta Pó RAL 9006 Silver Mate (Figura 21), ambas da marca Schuco.



Figura 20 - Amostra pintada com Pó RAL 9505 Polyester preto



Figura 21 - Amostra pintada com Pó RAL 9006 Silver Mate cinzento

As amostras foram submetidas ao processo de pintura utilizado na STA que se desenrola de acordo com as seguintes etapas: desgaseificação, pré-tratamento (plaforização), pintura, e polimerização.

### 3.1.1.3 Aço inoxidável

Outro dos objetivos deste trabalho inclui o teste de resistência à corrosão do aço inoxidável utilizado na STA (AISI 304), comparando-o com o aço AISI 316 LN, alternativa apresentada na secção 2.3.2.1, onde são abordados os aços inoxidáveis. Foram selecionadas duas amostras dos respectivos aços, as quais foram sujeitas ao mesmo tratamento superficial. Ambas as peças foram esmeriladas e setinadas, sendo o resultado final apresentado na Figura 22, para o AISI 304, e Figura 23, para o AISI 316 LN.



Figura 22 - Amostra do aço inoxidável AISI 304



Figura 23 - Amostra do aço inoxidável AISI 316 LN

## 3.2 Anodização de ligas para Fundição injetada

Como foi referido, um dos objetivos deste trabalho era o estudo da possibilidade de anodizar ligas de fundição injetada, alcançando um bom aspeto visual após anodização.

Foram estudadas três alternativas diferentes:

1. A seleção de ligas de alumínio diferentes das utilizadas na STA, tentando conciliar as melhores características para fundição injetada com as de anodização;
2. A redução do tamanho de grão dos precipitados de silício das ligas selecionadas;
3. A aplicação de uma camada de alumínio anodizável por PVD.

### 3.2.1 Seleção de ligas alternativas

Como alternativa às ligas utilizadas na STA para fundição injetada, foi escolhida a liga de alumínio  $AlSi_7$ , pelas razões já apresentadas na alínea 1 da secção 2.5. Deste modo foram sujeitas a anodização duas amostras, uma da liga  $AlSi_7$  e outra da liga Ag4Z, com o objetivo de comparar o aspeto visual entre ambas.

As duas amostras foram sujeitas à sequência de operações apresentada na Tabela 27. Depois de anodizadas, foi realizada uma análise visual, através da qual se concluiu que a amostra da liga  $AlSi_7$  apresentava um aspeto baço e escuro, de qualidade inferior ao da amostra da liga Ag4Z, já utilizada na STA para anodizar, como se apresenta na Figura 24 e na Figura 25.



Figura 24 - Liga de alumínio  $AlSi_7$  após anodização



Figura 25 - Liga de alumínio Ag4Z após anodização

### 3.2.2 Redução do tamanho de grão

De acordo com a proposta apresentada na alínea 2 da secção 2.5, foi realizado um tratamento térmico visando a redução de tamanho de grão dos precipitados de silício, com o objetivo de tornar a superfície da liga em causa mais homogênea potenciando a sua anodização. Para este tratamento foi escolhida, mais uma vez, uma amostra da liga  $AlSi_7$ . A amostra foi sujeita ao tratamento térmico T6, já apresentado na Tabela 25. Após o tratamento térmico foi realizada uma análise em microscópio ótico à microestrutura da amostra, a fim de verificar a sua resposta ao mesmo.

De acordo com o que se apresenta na Figura 26 e na Figura 27, é possível observar que, de facto, houve uma redução do tamanho de grão de silício, significando isto que o tratamento correspondeu ao pretendido.

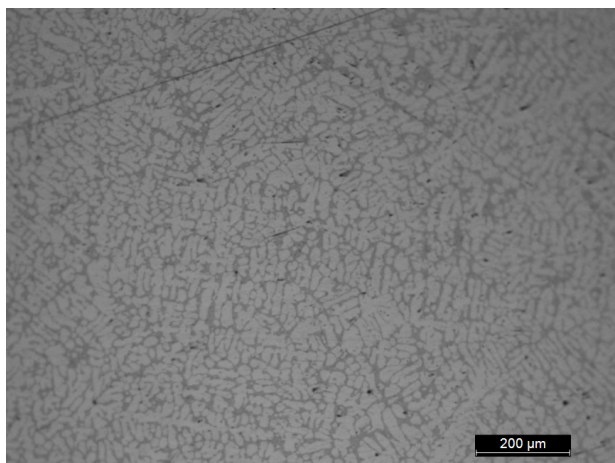


Figura 26 - Microestrutura da liga de alumínio AlSi7 sem tratamento térmico

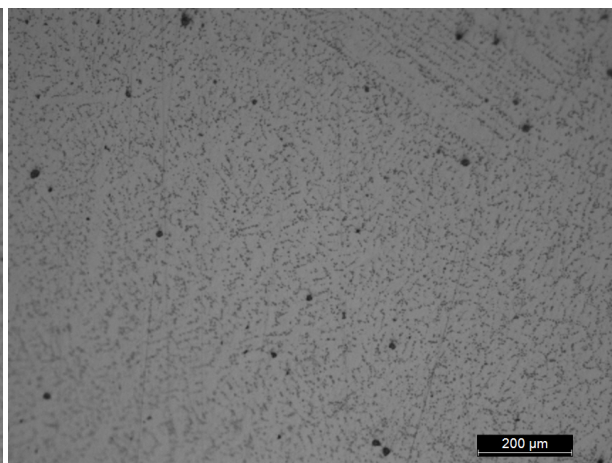


Figura 27 - Microestrutura da liga de alumínio AlSi7 após tratamento térmico T6 (ver Tabela 25)

Após o tratamento, foi efetuada nova anodização sobre a amostra tratada termicamente, de acordo com a sequência de anodização apresentada na Tabela 27. Após a anodização verificou-se um problema idêntico ao registado na secção 3.2.1: a amostra apresentava uma superfície escura e baça, não correspondendo ao pretendido pela STA.

### 3.2.3 Aplicação prévia de PVD

Para este ponto foi escolhida uma amostra de uma liga de alumínio de fundição injetada não anodizável, no caso a liga AlSi<sub>10</sub>, para testar a solução apresentada na alínea 3 da secção 2.5. A amostra foi sujeita a um revestimento por PVD, realizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, utilizando alumínio puro como material de deposição. A camada aplicada apresentava uma espessura de 3 μm. Após a deposição do alumínio, a amostra foi sujeita à sequência de anodização apresentada na Tabela 27. No final da sequência de anodização verificou-se que, devido a uma falha na condução da corrente elétrica, a anodização não foi bem sucedida, tendo a peça ficado com um aspeto baço. Devido a este percalço, e com o objetivo de recuperar a amostra, procurou-se remover a camada anodizada mergulhando-a em duas soluções químicas. A primeira, apresentada na Tabela 28, destinava-se a limpar a amostra, e a segunda, na Tabela 29, a remover a camada de óxido formada na superfície da amostra, devolvendo à peça um aspeto brilhante.

Solução	30% HNO <sub>3</sub> ; 70% H <sub>2</sub> O
Tempo	30 seg.
Temperatura	35 °C

Tabela 28 - Tratamento químico de remoção da camada anodizada

Solução	5% HCl; 1% HF; 94% H <sub>2</sub> O
Tempo	30 seg.
Temperatura	Temp. ambiente

Tabela 29 - Tratamento químico de desoxidação e limpeza

Se após estes tratamentos superficiais a amostra apresentasse um aspeto brilhante, característico do alumínio puro, a mesma estaria apta para nova tentativa de anodização. No entanto, como se apresenta na Figura 28, a superfície da amostra apresentava um aspeto baço, o que permite afirmar que aquando da primeira anodização a camada de alumínio puro, depositada por PVD, terá sido totalmente removida.



Figura 28 - Amostra revestida por PVD após anodização e tratamento químico de limpeza da camada anodizada

### 3.3 Testes em câmara de nevoeiro salino

Para testar a resistência à corrosão das alternativas apresentadas decidiu-se realizar um teste em câmara de nevoeiro salino. Embora o valor mínimo de resistência à corrosão exigido pela norma para que as peças obtenham classificação máxima sejam 240 horas sem apresentar nenhum problema, a STA decidiu que o teste deveria ter uma duração de 400 horas, aproximadamente 16 dias, garantindo assim não só a classificação máxima, mas também maior credibilidade perante o cliente.

#### 3.3.1 Condições do ensaio

O teste em câmara de nevoeiro salino foi realizado respeitando a norma *ASTM B117-03 Standard Practice for Operating Salt Spray*. Para a realização deste teste foi utilizado o equipamento *Testing Apparatus, model 606/400l* da marca Erichsen, da FEUP.

Para este teste, e como é indicado pela norma, foi utilizada uma solução aquosa de 5% NaCl, em volume. Para respeitar esta relação, a norma sugere que se multiplique a quantidade pretendida de água por 0,053 para obter a quantidade de NaCl. Assim para 40 litros de água são precisos 2,12 Kg de NaCl. Estas foram as quantidades utilizadas neste teste. A solução utilizada apresentou um pH entre 6,5 e 7,5 sendo a temperatura na câmara, durante o ensaio, de 35°C, respeitando a norma.

As seis amostras selecionadas para realizar o teste foram posicionadas na câmara suspensas por um fio de *nylon* como se apresenta na Figura 29



Figura 29 - Posicionamento das amostras na câmara de nevoeiro salino de dois ângulos diferentes

Durante o teste foram realizadas verificações às amostras e ao ambiente no interior da câmara, de três em três dias. Em cada verificação as amostras era feita uma análise visual, conferindo se estas apresentavam algum vestígio de corrosão e pesadas com o objetivo de registrar alguma variação de massa. Ao longo das verificações não se registou nenhuma variação na massa das peças; contudo, na medição efetuada após decorridas 312 horas, começaram a verificar-se vestígios de corrosão em algumas peças, assinaladas na Tabela 30. É de notar que as peças que apresentaram vestígios de corrosão foram as que anteriormente foram referidas como não apropriadas para o tratamento de anodização. A Tabela 31 apresenta algumas imagens que representam o momento em que foram detetados os primeiros indícios de corrosão após 312 h de ensaio, na amostra AlSi<sub>7</sub>. As marcas de corrosão registadas na amostra AlSi<sub>10</sub> só foram verificadas após as 400 h de teste. Em ambas as amostras, embora com maior incidência na amostra de AlSi<sub>7</sub>, foi

possível observar o aparecimento de corrosão por picada, mas principalmente deu-se a deposição de óxidos, devido à interação do alumínio com o ambiente extremamente húmido existente no interior da câmara, provocando a degradação do material e o aparecimento de  $Al(OH)_3$ . A Figura 30 apresenta esta degradação. Nas amostras restantes não foram registados vestígios de corrosão.

	Amostras	Aspetto visual				
		96 h	168 h	240 h	312 h	400 h
Anodizado	AlSi <sub>10</sub>	+	+	+	+	-
	Am3ST	+	+	+	+	+
	Amg4Z	+	+	+	+	+
	AlSi <sub>7</sub>	+	+	+	-	-
Pintura, Preto	AlSi <sub>10</sub>	+	+	+	+	+
	Am3ST	+	+	+	+	+
	Amg4Z	+	+	+	+	+
	AlSi <sub>7</sub>	+	+	+	+	+
Pintura, Cinzento	AlSi <sub>10</sub>	+	+	+	+	+
	Am3ST	+	+	+	+	+
	Amg4Z	+	+	+	+	+
	AlSi <sub>7</sub>	+	+	+	+	+
Aço Inox	304	+	+	+	+	+
	316 LN	+	+	+	+	+

Tabela 30 - Análise do aspeto visual das amostras ao longo do ensaio (+ sem vestígios de corrosão; - com vestígios de corrosão)

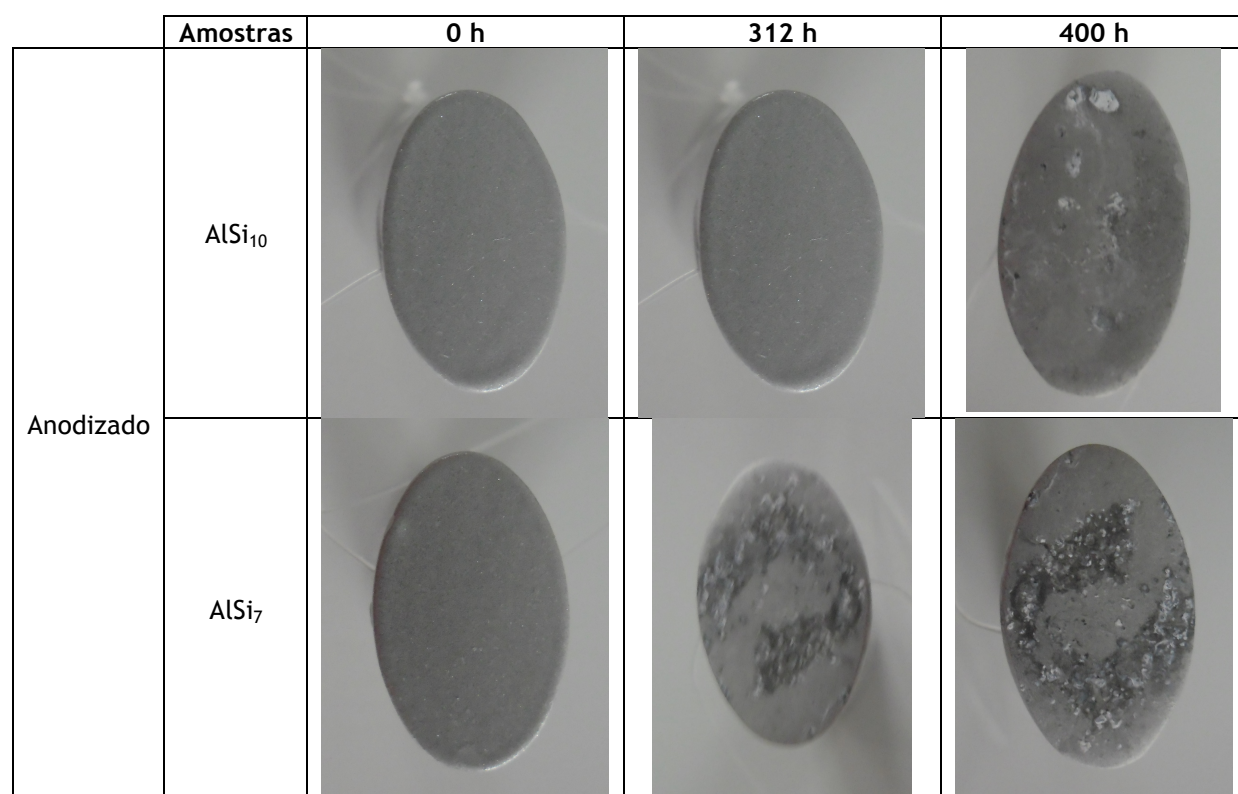


Tabela 31 - Imagens representativas dos vestígios de corrosão observadas nas amostras

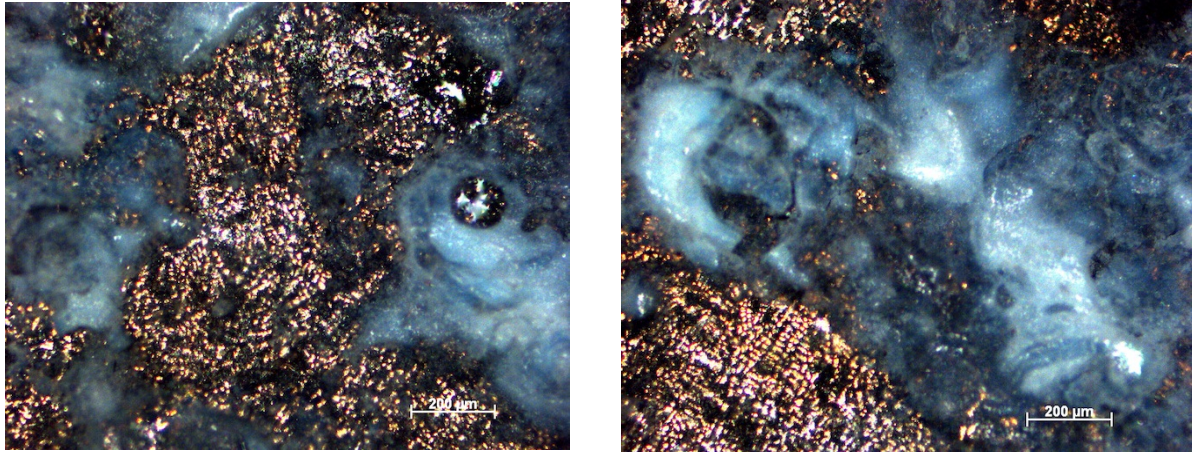


Figura 30 - Imagem obtida em microscópio ótico que apresenta a degradação da amostra de  $\text{AlSi}_7$  por deposição de  $\text{Al}[\text{OH}]_3$

## 4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve basicamente dois objetivos distintos. Em primeiro lugar, a procura de soluções que permitissem à empresa STA desenvolver uma linha de produto com excelentes características de resistência à corrosão. Em segundo lugar melhorar a produtividade da empresa, procurando soluções que tornassem possível a anodização de peças em alumínio provenientes da fundição injetada.

Quanto à primeira parte do trabalho foi possível obter várias conclusões. De acordo com os resultados obtidos no ensaio em câmara de nevoeiro salino é possível concluir que os métodos de proteção de superfície utilizados - a pintura e a anodização - são bastante eficazes, tendo as amostras resistido a 400h horas de ensaio, acima do necessário para respeitar a norma (240h). Concluiu-se também que, de acordo com a bibliografia, a anodização de peças em ligas de alumínio com um teor de Si próximo ou superior a 7% não é viável pois estas não apresentam a qualidade visual desejada, como observado nas amostras de  $AlSi_{10}$  e  $AlSi_7$ . Por outro lado, verificou-se que embora não tenham cumprido o objetivo das 400h, as amostras de  $AlSi_{10}$  e  $AlSi_7$  ultrapassaram a barreira das 240h imposta pela norma sem vestígios de corrosão. Com isto é possível concluir que se tratam de ligas com excelentes características de resistência à corrosão, capazes de responder às exigências colocadas pelas aplicações onde as peças da STA são utilizadas. Em relação às duas tintas aplicadas - a preta, Pó Ral 9505 *Polyester*, e a cinzenta, Pó Ral 9006, ambas da marca Schuco - revelaram-se bastante eficazes na proteção das peças contra a corrosão. Pode então concluir-se que a utilização de tintas de *polyester* é bastante eficaz no cumprimento deste objetivo. Em relação ao aço inoxidável e como não foram detetados quaisquer vestígios de corrosão em nenhuma das amostras, pode concluir-se que ambos os aços, o AISI 304 e o AISI 316 LN, são indicados para aplicações em que estejam sujeitos à corrosão.

Relativamente ao segundo objetivo, não foi encontrada nenhuma solução satisfatória que permitia resolver o problema apresentado. A escolha de uma liga alternativa que possibilitasse o seu processamento por fundição injetada e posterior anodização não apresentou os resultados esperados, uma vez que a amostra testada não ficou com o aspeto visual pretendido. Ainda assim, esta

solução não está definitivamente colocada de parte visto não ter sido possível testar ligas com um teor de silício inferior ao da liga  $\text{AlSi}_7$ , como por exemplo a liga de alumínio  $\text{AlSi}_5$ , também sugerida como alternativa na parte teórica. Quanto à opção que visava a realização de um tratamento térmico para reduzir o tamanho de grão dos precipitados de silício, não se registaram resultados positivos; embora tenha sido possível reduzir o tamanho de grão, o aspeto final da peça, após anodização, não foi o desejado. Com isto é possível concluir que a realização de um tratamento térmico de redução de tamanho de grão não é *per si* suficiente para viabilizar a anodização das peças que foram submetidas a esse tratamento. Por fim, quanto à solução que tinha como objetivo a deposição de alumínio puro por PVD e posterior anodização, não foi possível confirmar se é uma solução válida uma vez que a mesma não foi testada, devido a uma falha no equipamento de anodização aquando do teste da única amostra ensaiada.

## 5 TRABALHOS FUTUROS

Futuramente poder-se-á fazer um estudo mais aprofundado sobre a questão da anodização de ligas de alumínio para fundição injetada, após deposição de alumínio puro por PVD, testando novamente esta alternativa, uma vez que com este trabalho não foi possível realizar esse teste. No caso de ainda assim não ser possível anodizar a peça obtida, seria importante verificar a possibilidade da deposição de uma camada de alumínio puro com uma espessura superior à utilizada, uma vez que, através da pesquisa realizada, existem evidências do sucesso desta opção em peças com uma camada de alumínio puro com uma espessura de cerca de 20  $\mu\text{m}$ . Se esta alternativa for possível, a peça deverá novamente ser sujeita ao processo de anodização. Por fim os resultados deverão ser analisados, verificando em primeiro lugar o aspeto visual da peça e por último a sua resistência à corrosão, realizados testes em câmara de nevoeiro salino.

Uma vez que não foi possível realizar testes de anodização à liga de alumínio  $\text{AlSi}_5$ , seria muito importante que esse trabalho pudesse ser feito. Segundo a pesquisa bibliográfica, esta seria uma liga com boa aptidão à anodização, podendo ser processada por fundição injetada. Deste modo, devem ser feitos esforços para encontrar a liga no mercado e proceder aos respetivos testes, verificando se, após anodização, esta apresenta um bom aspeto visual. Se isso se verificar, devem ser realizados testes de resistência à corrosão.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Talbot, David and Talbot, James: “Corrosion Science and Technology”, CRC press 1997
- [2] TALAT- Training in Aluminium Application Technologies, disponível em <<http://www.slideshare.net/corematerials/talat-lecture-1501-properties-characteristics-and-alloys-of-aluminium>>; acessado a 21 fevereiro de 2012
- [3] <<http://www.lmc.ep.usp.br/people/valdir/pef5736/corrosao/PROTEÇÃOOCORROSÃO.html>>;acessado a 19 de março de 2012
- [4] Appelt, Patrícia; Veronese, Jonatam; Stockman, Eduardo; Kleinubing, Jorge J.; “Corrosão Galvânica”; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Pato Branco, Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/55316579/Galvanizacao>>; acessado a 20 de março 2012
- [5] Kaufman, John G.; Rooy, Elwin L. “Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications”; American Foundry society, ASM International 2004
- [6] TALAT - Training in Aluminium Application Technologies, disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/21294474/TALAT-Lecture-5104-Basic-Approaches-to-Prevent-Corrosion-of-Aluminium>>; acessado a 6 de março de 2012
- [7] Wernick, S.; Pinner, R.; Sheasby, P. G.; “The surfasse treatment and finishing of aluminium and its alloys”; Fifth edition
- [8] Moraes, Ana Carolina; “Estudo da corrosão intergranular em ligas de alumínio de fundição, influências do teor de cobre e do tratamento de solubilização” disponível em <[http://biblioteca.universia.net/html\\_bura/ficha/params/title/estudo-da-corrosão-intergranular-em-ligas-aluminio-fundição-influências-do/id/21375463.html](http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/estudo-da-corrosão-intergranular-em-ligas-aluminio-fundição-influências-do/id/21375463.html)>; Acessado a 20 de fevereiro de 2012
- [9] Revista Matéria disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10625/>>; acessado a 20 de fevereiro de 2012>
- [10] Altenpohl, Dietrich G. “Aluminum: Technology, Applications and Environment: A Profile of a Modern Metal Aluminum from Within”; Sixth edition
- [11] Prazeres, Ulysses; Feitosa, Johnyson; Cruz, Kleber; Mattos, Paulo; Quaresma, José “INFLUÊNCIA DO Si E DO Mg NA EVOLUÇÃO DA FLUIDEZ E DA MACROESTRUTURA DE LIGAS DILUIDAS DA SÉRIE 6XXX” Disponível em <<http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/071005355.pdf>>; acessado a 28 de fevereiro de 2012
- [12] ASM Metals HandBook Volume 02 - “Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Mat”, ASM International, 1990
- [13] Arango, Juan; Martorano, Marcelo “ESTUDO DO REFINO DE GRÃO DE LIGAS Al-Si ATRAVÉS DE INOCULANTES DO SISTEMA Al-Ti-B” Disponível em <<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/Publicacoes/CONAF%202009%20-%20Refino.pdf>>; acessado a 8 de fevereiro de 2012
- [14] Kong, L. X.; She, F. H.; Gao, W. M.; Nahavandi, S.; Hodgson, P. D. “Integrated optimization system for high pressure die casting processes”; Centre for Material and Fibre Innovation, Deakin University
- [15] Laukli, Hans Ivar “High Pressure Die Casting of Aluminium and Magnesium Alloys - Grain Structure and Segregation Characteristics”
- [16] “Aluminium Casting Techniques - Sand Casting and Die Casting Processes”, Disponível em <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1392>>, acessado a 16 de Fevereiro 2012

- [17] CES EDUPACK 2011, Grantha's software
- [18] Moreira, Marcelo "Alumínio e as suas Ligas" Disponível em <<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/aluminioconf.pdf>>, acessado a 7 março de 2012
- [19] Salvo, João; Junior Nelson "Ligas de Alumíni das séries 3xxx e 3xx.x- Composição, Propriedades e Aplicações" Disponível em <<http://pt.scribd.com/nponcejr/d/38840950-Ligas-de-Aluminio-da-Serie-3xxx-e-3xx>>, acessado a 7 de março 2012
- [20] Website oficial de Norton Aluminium, Disponível em <<http://www.nortal.co.uk/alloys/lm6.asp>>, acessado a 20 de fevereiro de 2012
- [21] Varley, P. C. "The Technology os Aluminium and its Alloys", CRC Press 1970
- [22] Mark, Udochukwu "The Effect of Solidification Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of as-cast Al - Si Eutectic Alloy" Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/52994675/B-Eng-Thesis-Effect-of-Solidification-Rate-on-Microstructure-and-Mechanical-Properties-2002-by-Udochukwu-Mark>>, acessado a 20 de fevereiro de 2012
- [23] Website oficial de Hadleigh Castings-Aluminium Technology Disponível em <<http://www.hadleighcastings.com/uploads/LM9%20Alloy%20Detail.pdf>>, acessado a 20 de fevereiro de 2012
- [24] Dados da STA, Sociedade Transformadora de Alumínios
- [25] Material Specification, Disponível em <<http://www.3trpd.co.uk/content/pdfs/aluminium-alsi10mg.pdf>>, acessado a 21 de fevereiro de 2012
- [26] Website oficial de Aluinfo, Disponível em <<http://www.aluinfo.com.br/novo/materiais/fundicao-por-gravidade>>, acessado a 17 de fevereiro de 2012
- [27] Gravity Casting, Disponível em <<http://ivanirons.hubpages.com/hub/Gravity-casting>>, acessado a 16 de fevereiro de 2012
- [28] Website oficial de Aluinfo, Disponível em <<http://www.aluinfo.com.br/novo/materiais/fundicao-por-gravidade>>, acessado a 16 de fevereiro de 2012
- [29] Website oficial de MaqMec, Disponível em <[http://maqmec.com/downloads/metprocfab/Apostila%20conf%20Mecanica\\_color.pdf](http://maqmec.com/downloads/metprocfab/Apostila%20conf%20Mecanica_color.pdf)>, acessado a 20 de fevereiro de 2012
- [30] Website oficial de ABAL, Associação Brasileira do Alumínio, Disponível em <[http://www.abal.org.br/aluminio/ligas\\_trabalhaveis.asp](http://www.abal.org.br/aluminio/ligas_trabalhaveis.asp)>, acessado a 17 de fevereiro de 2012
- [31] Website oficial de ASM-Aerospace Specification Metals, Disponível em <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5052H38>>, acessado a 17 de fevereiro de 2012
- [32] Website oficial de InfoMet Disponível em <[http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod\\_tema=10&cod\\_secao=11&cod\\_assunto=53](http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod_tema=10&cod_secao=11&cod_assunto=53)>, acessado a 21 de fevereiro de 2012
- [33] Website oficial de "Aluminium Alloys - Alumínio 5251 Properties, Fabrication and Applications", data by Aalco, disponível em <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2805>>, acessado a 21 de fevereiro de 2012
- [34] "Alumínio 5456", Website oficial de Metal Suppliers Online Disponível em <<http://www.supplieronline.com/propertypages/5456.asp>>, acessado a 21 de fevereiro de 2012
- [35] ASM Metals HandBook Volume 01 - Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys; ASM International, 1990

- [36] **Efeito dos Elementos de Liga** Disponível em <<http://disciplinas.dcm.fct.unl.pt/ttm/ttool2-0.pdf>>, acessido a 22 de fevereiro de 2012
- [37] Ciuccio, Luiz R.; Luiz, Nelis Evangelista; Filho, Athos J.; Soares, Michel A. D.; **“Determinação das resistências à esterilização em autoclave, à corrosão e à exposição térmica de instrumental cirúrgico - Estudo do caso”**, Website oficial de Revodonto Disponível em <[http://revodonto.bvsalud.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1984-59602010000200010](http://revodonto.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-59602010000200010)>, acessido a 22 de fevereiro de 2012
- [38] Apontamentos da disciplina de **Tratamentos Térmicos**, professor Henrique Santos
- [39] Asm Metals Handbook Volume 9 - **Metallography And Microstruct**; ASM International, 1990
- [40] Website oficial de **Outo Kumpu** Disponível em <<http://www.outokumpu.com/files/Group/HR/Documents/STAINLESS20.pdf>>, acessido a 21 de fevereiro de 2012
- [41] Davis, J. R. **“Surface Engineering, for Corrosion and Wear Resistance”**, Maney Publishing, 2001
- [42] **“Comportamento do Alumínio Anodizado à Corrosão Atmosférica”**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004 Disponível em <[http://www.apal.pt/pdf/ET\\_02.pdf](http://www.apal.pt/pdf/ET_02.pdf)>, acessido a 21 de fevereiro de 2012
- [43] **Specifications for the QUALANOD-Quality Label for Sulphuric Acid-Based Anodizing of Aluminium.**
- [44] **Ligas de Alumínio 5052** Disponível em <<http://pt.scribd.com/lucavanisteroy/d/47090377-Liga-de-aluminio-5052>>, acessido a 17 de fevereiro de 2012
- [45] Mitchell, Philip; Mitchell, E. Philip **“Tool and Manufacturing Engineers Handbook Knowledge Base”**; Third edition
- [46] Charles R, Hegedus; Donald J, Hirst; Anthony T, Eng; William J, Green **“Epoxy Corrosion-Resistant Coating”** Disponível em <<http://www.google.pt/patents?hl=pt-PT&lr=&vid=USPAT5059640&id=kwlBAAAAEBAJ&oi=fnd&dq=epoxy+corrosion&printsec=abstract#v=onepage&q=epoxy%20corrosion&f=false>>, acessido a 5 de março de 2012
- [47] Hita, Diego G. **“Uso de Revestimentos para Prevenir Corrosão em Vasos de Processo Operando a Elevadas Temperaturas e Pressões”** Disponível em <<http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/pdf/cote059.pdf>>, acessido a 1 de março de 2012
- [48] **“Chemical resistance of epoxy to common products as acetic acid, alcohol, diesel oil and more”**, Website oficial de The Engineering Tool Box Disponível em <[http://www.engineeringtoolbox.com/chemical-resistance-epoxy-d\\_786.html](http://www.engineeringtoolbox.com/chemical-resistance-epoxy-d_786.html)>, acessido a 13 de março de 2012
- [49] Khanna, Anand S. **“High-Performance Organic Coatings”**, CRC
- [50] Oliveira, Nelson; Coelho, Rui **“Curso Tintas em Pó”**, Empresa CIN-Corporação Industrial do Norte, S.A.
- [51] L.A. Dobrzański\*, K. Lukaszewicz, D. Pakula, J. Mikula **“Corrosion resistance of multilayer and gradient coatings deposited by PVD and CVD techniques”** Disponível em <[http://archivesmse.org/vol28\\_1/2812.pdf](http://archivesmse.org/vol28_1/2812.pdf)>, acessido 5 de março de 2012
- [52] **“Manufacturing Processes - Physical Vapor Deposition (PVD)”**, Website oficial de Engineers Handbook Disponível em <<http://www.engineershandbook.com/MfgMethods/PVD.htm>>, acessido a 5 de março de 2012
- [53] Apontamentos da disciplina de **Revestimentos e Tratamentos de Superfícies**
- [54] Tracton, Arthor A. **“Coatings technology handbook”**, Third Edition.

- [55] Sabatino, Marisa Di, “Fluidity of Aluminium Foundry Alloys” Disponível em <<http://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=Fluidity+of+Aluminium+Foundry+Alloys&ie=UTF-8&oe=UTF-8>>, acessado a 5 março 2012
- [56] “Anodizing of Aluminium with optimized properties”, Website oficial de European Aluminium Award Disponível em <<http://www.aluminium-award.eu/2010/entries/young-designers-prize/en-anodizing-of-aluminium-with-optimized-properties/>> acessado a 28 de maio de 2012