

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

CAIO JOSÉ WEBER GUAZZELLI

**CORROSÃO DE ALUMÍNIO EM TROCADORES DE CALOR: UM ESTUDO PARA
MELHORIA DE QUALIDADE UTILIZANDO A METODOLOGIA DE
PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

Taubaté - SP

2017

CAIO JOSÉ WEBER GUAZZELLI

**CORROSÃO DE ALUMÍNIO EM TROCADORES DE CALOR: UM ESTUDO PARA
MELHORIA DE QUALIDADE UTILIZANDO A METODOLOGIA DE
PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, Área de Concentração: Produção Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Faria Neto.

Taubaté - SP

2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas – UNITAU - Biblioteca de Engenharia Mecânica**

G919C

Guazzelli, Caio José Weber

Corrosão de alumínio em trocadores de calor: um estudo para melhoria de qualidade utilizando a metodologia de planejamento de experimentos. / Caio José Weber Guazzelli - 2017.

61f. : il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica na área de Produção Mecânica) – Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica, 2017

Orientador: Prof. Dr. Antonio Faria Neto, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Corrosão do alumínio. 2. Planejamento de experimentos. 3. Revestimentos. 4. Corrosão atmosférica. 5. Névoa salina. I. Título.

CAIO JOSÉ WEBER GUAZZELLI

**CORROSÃO DE ALUMÍNIO EM TROCADORES DE CALOR: UM ESTUDO PARA
MELHORIA DE QUALIDADE UTILIZANDO A METODOLOGIA DE
PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

Data: 24/02/2017

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, Área de Concentração: Produção Mecânica.

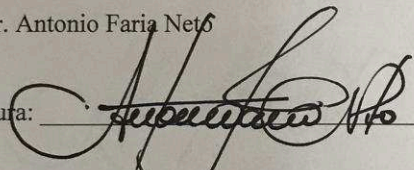
Resultado: Aprovado

Orientador: Prof. Dr. Antonio Faria Neto.

BANCA EXAMINADORA

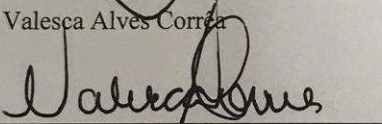
Prof. Dr. Antonio Faria Neto

Universidade de Taubaté

Assinatura: 

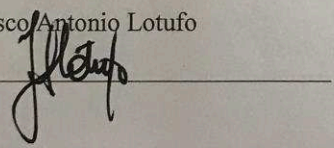
Profa. Dra. Valesca Alves Corrêa

Universidade de Taubaté

Assinatura: 

Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo

Universidade Estadual Paulista

Assinatura: 

Dedico este estudo:
aos meus pais;
minha irmã; e
a minha esposa.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a muitas pessoas que contribuíram para a conclusão deste trabalho, de uma forma e de outra, mas cada um do seu jeito foram fundamentais nessa minha caminhada. Em especial aos meus pais Carlos e Célia pela criação que me foi dada e permitiu me tornar quem eu sou hoje. A minha amada esposa Christina que me suportou e deu total apoio nesses momentos. E ao meu orientador Professor Faria, por ser um grande mentor durante este projeto, pela ajuda, pela motivação e ensinamentos que levarei para o resto de minha vida.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”
Albert Einstein.

RESUMO

O alumínio e suas ligas são altamente empregados no cenário global, sendo largamente utilizados nas indústrias de refrigeração e condicionamento de ar. Atualmente são empregados na fabricação de trocadores de calor, principalmente as ligas de alumínio do tipo: AA8079, AA8011 e a AA8006. Dado o exposto, o presente trabalho irá abordar um caso real de corrosão do alumínio em trocadores de calor instalados em regiões litorâneas. Nestes casos, foi evidenciada a presença de corrosão acelerada do alumínio, comprometendo assim o seu funcionamento e a vida útil dos equipamentos instalados sob as condições mencionadas. Neste contexto, o objetivo principal deste projeto é avaliar diferentes medidas de proteção à corrosão do alumínio AA8006 em trocadores de calor, por intermédio de ensaios acelerados de névoa salina em corpos de prova. A presente pesquisa buscou o entendimento do problema, bem como analisar os fatores que impactam a corrosão do alumínio quando aplicado em condições agressivas, considerando seus princípios e dimensões técnicas e tecnológicas. Os efeitos dos fatores que afetam a corrosão nos trocadores de calor foram determinados por intermédio de um planejamento fatorial 3^2 completo. Os resultados foram analisados a partir do efeito médio dos fatores e da análise de variância (ANOVA). Como conclusão podemos identificar o melhor ajuste dos fatores tipo do material e densidade de aletas (número de aletas por polegadas), quando for aplicado o material tipo III (alumínio gold + pintura) e o maior número de aletas, maior será o tempo sem corrosão.

Palavras Chaves: Corrosão do Alumínio; Planejamento de Experimentos; Revestimentos; Corrosão atmosférica; Névoa salina.

ABSTRACT

ALUMINUM CORROSION IN: A STUDY TO IMPROVEMENT QUALITY SUPORT BY DESIGN OF EXPERIMENTS

Aluminum and its alloys are frequently used on the global stage and are widely applied in the refrigeration and air conditioning industries. They are currently used in the manufacture of heat exchangers, predominantly types of aluminum alloys: AA8079 AA8011 and AA8006. Based on this, this research studies a real case of aluminum corrosion applied to heat exchangers installed in coastal regions. In each case, accelerated corrosion was observed in the heat exchangers, thus compromising their operation and useful life of the equipment installed under the above mentioned conditions. Therefore, the main objective of this project is to evaluate different solutions of corrosion protection of AA8006 aluminum in heat exchangers, applying salt spray tests in samples of heat exchangers. This research aimed to understand the problem of corrosion of aluminum used in heat exchangers and the factors that affect the strength characteristics of aluminum corrosion when applied in aggressive conditions, considering its technical and technological principles and dimensions. The effects of factors that affecting corrosion in heat exchangers were determined using a factorial design 3^2 . The results were analyzed from the mean effect of the factors and the analysis of variance (ANOVA). As a conclusion, we can identify the best adjustment of the factors material type and density of fins (number of fins per inch), when material type III (gold aluminum + paint) and the larger number of fins are applied, the longer time without corrosion was reached.

Key words: Aluminum corrosion; Design of Experiments, Coatings; Atmospheric corrosion; Salt Spray.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Série da liga de alumínio - Propriedades mecânicas típicas	26
Figura 2 - Diagrama de Porbaix	28
Figura 3 - Passividade da liga de alumínio.....	30
Figura 4 - Propagação dos Pites	32
Figura 5 - Mecanismo de corrosão Galvânica	33
Figura 6 – Corrosão Filiforme do revestimento do alumínio	34
Figura 7 - Modelo geral de um processo ou sistema	36
Figura 8 - Combinações de tratamento em um projeto 3^2	36
Figura 9 - Corpo de prova.....	38
Figura 10 - Fluxo de fabricação dos corpos de prova.....	39
Figura 11 - Câmara de teste acelerado de névoa salina.....	39
Figura 12 - Corpos de prova durante o teste acelerado de névoa salina.....	40
Figura 13 - Critério de reprovação	41
Figura 14 - Diagrama de Ishikawa	42
Figura 15 - Exemplos de corrosão Galvânica, por Pites e Filiforme.....	43
Figura 16 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos da Tabela 7.....	47
Figura 17 - Resíduos versus Valor ajustado de horas sem corrosão.	48
Figura 18 - Residuais versus Material (a) Residuais versus FPI (b).	49
Figura 19 – Tipo do Material versus Densidade de Aletas para Tabela 5.....	51
Figura 20 - Colarinho da aleta	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características dos fatores..... 43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo da corrosão Al, Fe, Zn e Cu.....	29
Tabela 2 - Composição química alumínio.....	38
Tabela 3 - Composição química cobre.....	38
Tabela 4 – Desenho Fatorial com três réplicas.....	44
Tabela 5 – Sumariza os resultados do planejamento.....	45
Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA).....	45
Tabela 7 – Resíduos do Experimento.....	47
Tabela 8 – Diferenças entre as combinações de todos os fatores.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS e siglas

AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>
Alclad	Revestimento Realizado em Ligas de Duralumínio
ATR	<i>Attenuated Total Reflectance Infrared Spectroscopy</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>
FPI	<i>Fin per Inch</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared</i>
ISO	<i>International Standards Organisation</i>
LPR	<i>Linear polarisation resistance</i>
MEV	Microscópio eletrônico de varredura (MEV)
MSE	<i>Mean squared error</i>
SAM	<i>Self Assembly Monolayer</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
TS	<i>Tensile Strength</i>
YS	<i>Yield Strength</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVO	15
1.2	MÉTODO	15
1.3	JUSTIFICATIVA DE PESQUISA.....	16
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	24
2.2	PROPRIEDADES DO ALUMINIO	26
2.3	CORROSÃO DO ALUMÍNIO	27
2.3.1	Passividade do Alumínio.....	29
2.3.2	Corrosão por Pites	30
2.3.3	Corrosão Galvânica.....	32
2.3.4	Corrosão Filiforme	33
2.3.5	Corrosão sob tensão mecânica	34
2.4	ENSAIOS ACELERADOS DE CORROSÃO.....	34
2.5	PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO DE EXPERIMENTOS	35
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	38
3.1	MATERIAIS	38
3.2	PREPARAÇÃO CORPOS DE PROVA	38
3.3	ENSAIOS DE NÉVOA SALINA	39
3.4	MÉTODOS.....	41
3.4.1	Fatores que afetam a corrosão.....	41
3.4.2	Análise dos dados.....	42
4	RESULTADOS	45
4.1	ANÁLISE DA VARIÂNCIA.....	45
4.2	VERIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA.....	46
4.3	VERIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO MODELO	46
4.4	COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS.....	49
4.5	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	51
5	CONCLUSÕES.....	54
6	SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS.....	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas têm sido amplamente utilizados em ambientes externos, especialmente na fabricação de produtos de refrigeração e condicionamento de ar. Isto se deve principalmente em função das propriedades que estas ligas possuem, tais como baixa densidade, boa ductilidade e condutividades térmica e elétrica, além de resistência à corrosão e mecânica compatíveis com suas diversas aplicações. Nesta área de fabricação, o alumínio e suas ligas são geralmente expostos a ambientes atmosféricos agressivos e podem ser afetados por distintas formas de corrosão atmosférica, tais como: corrosão por pites, corrosão galvânica, corrosão filiforme, corrosão intergranular e corrosão sobtensão. Segundo Wang et al. (2012), o alumínio e suas ligas são expostos a variados ambientes atmosféricos, e podem ser afetados por diferentes formas de corrosão atmosféricas.

Para realizar a aplicação industrial é de extrema importância analisar os comportamentos e os mecanismos de corrosão do alumínio. Alguns testes laboratoriais têm sido conduzidos com a finalidade de estudar a influência do ambiente atmosférico no comportamento da corrosão do alumínio, tais como: testes de íons corrosivos (por exemplo: Cl^- , SO_2 , NO_x e CO^2), umidade relativa e tempo de molhamento, (LIU et al., 2014).

Os principais tipos de liga de alumínio empregados na fabricação de trocadores de calor são: a AA8079, AA8011 e a AA8006. Estas ainda podem ser fornecidas com uma camada de proteção epóxi, que tem como função proteger o alumínio contra corrosão. A resistência à corrosão do alumínio está baseada na sua habilidade de formar um filme de óxido sobre sua superfície. Por característica, essas ligas são reativas quando expostas ao oxigênio desenvolvendo uma camada de filme óxido que aumenta a sua resistência à corrosão, (YOUNIS et al., 2013).

A corrosão do alumínio em trocadores de calor ocorre quando estes são aplicados próximos a ambientes agressivos, sem a adequada proteção. Segundo Liu et al. (2014), os dois principais fatores que regulam a taxa de corrosão do alumínio são o tempo de molhamento e a contaminação por sulfeto de enxofre (SO_2) ou cloreto (Cl^-), sendo o segundo, o componente mais destrutivo. O cloreto possui uma forte tendência de destruir o filme natural de óxido e causar uma significativa degradação do alumínio. Íons de sulfeto são incorporados nas camadas corrosivas superficiais, acelerando assim, a taxa de corrosão. Estas condições atmosféricas podem causar a degradação ou destruição prematura do alumínio, acarretando na

falha dos equipamentos. Problemas como estes podem ocorrer quando a seleção de proteções contra corrosão não são feitas corretamente.

A literatura relata o emprego de técnicas que previnem ou evitam a corrosão do alumínio. No entanto, não foram encontrados estudos que avaliassem soluções para a liga AA8006, utilizada em trocadores de calor. Diversos trabalhos estudaram a corrosão do alumínio no formato de chapas ou tubos, porém, em muitos casos, estes não representam, na totalidade, a condição real de aplicação dos produtos. Buscando preencher tal lacuna, foi avaliado, no presente trabalho, a corrosão da liga de alumínio AA8006 em corpos de prova que representam em escala reduzida o trocador de calor. Os corpos de provas foram submetidos ao teste acelerado de corrosão laboratorial de névoa salina. Com a ajuda da metodologia de planejamento de experimentos, foi possível avaliar o efeito dos fatores que influenciam no número de horas sem corrosão. Foram encontradas significativas diferenças na inibição da corrosão em função das diferenças do tipo do material e na densidade de aletas (quantidade de aletas por polegada), isto foi fundamental para definir o conjunto de fatores e níveis, que maximizam o número de horas sem corrosão do alumínio.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar diferentes medidas de proteção à corrosão do alumínio AA8006 em trocadores de calor.

Os objetivos específicos:

- Identificação dos fatores que impactam na inibição da corrosão.
- Realização dos ensaios de névoa salina nos corpos de prova.
- Avaliar o efeito dos fatores na inibição da corrosão, bem como a interação entre eles.

1.2 MÉTODO

Ensaio acelerado de névoa salina, estatisticamente planejada e usando o próprio produto em escala reduzida.

1.3 JUSTIFICATIVA DE PESQUISA

Segundo NACE International (*National Association of Corrosion Engineers*), estudos realizados por agências independentes nos EUA indicam que os custos da corrosão do alumínio no âmbito comercial, residencial e de transporte, chegam a 276 bilhões de dólares ao ano, o que representa em torno de 3,1% do produto interno bruto americano. Os custos associados incluem os gastos em serviço de controle da corrosão, pesquisa, desenvolvimento e treinamento. É estimado que os custos diretos sejam na ordem de 121 bilhões de dólares e a maior parte (88,3%) está relacionado aos tratamentos de revestimentos orgânicos. Embora, dados concretos sobre a situação no Brasil não estejam disponíveis, acredita-se que os custos da corrosão no alumínio sejam também elevados.

A empresa estudada, onde foram coletados os dados, tem enfrentado problemas de corrosão acelerada em seus trocadores de calor. Devido a isto tem elevado seu custo de assistência técnica e comprometido à venda de seus produtos. Após os equipamentos estarem instalados em campo foram reportados casos em que o alumínio apresenta degradação acelerada depois de um período de três a seis meses em funcionamento, ocorrendo de forma prematura à oxidação, corrosão e o deslocamento do verniz epóxi. Por essas razões o presente trabalho se justifica.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho trata de um estudo de caso de corrosão do alumínio em trocadores de calor instalados em ambientes agressivos. Foram estudadas serpentinas com dimensões de quatro a sete metros de comprimento, fabricadas com a liga de alumínio AA8006, com pintura epóxi e têmpera O.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os conceitos referentes ao alumínio e suas ligas, corrosão do alumínio, revestimentos e planejamento de experimentos.

A pesquisa bibliográfica para este trabalho ficou limitada aos artigos pesquisados na base *Web of Science* do Portal CAPES, entre os anos de 2005 a 2016 e dissertações sobre o assunto.

Esta pesquisa iniciou-se com uma revisão bibliográfica buscando os avanços mais recentes nas áreas de corrosão do alumínio, revestimentos e planejamento de experimentos empregados em pesquisas similares. A pesquisa foi realizada com a busca de referências na base de dados *Web of Science* com os termos “*Aluminum Corrosion*” e “*Design of Experiments*” e posteriormente com os termos “Corrosão do Alumínio” e “Planejamento de Experimentos” entre os anos de 2005 a 2016. Após uma análise preliminar da relevância dos artigos, foram selecionados os artigos mais citados.

Bajat et al. (2010), investigou o impacto na resistência à corrosão do alumínio de filmes viniltrióxido-silano (VTES) aplicados com diferentes concentrações de silano, exposto a uma solução de 3% de cloreto de sódio (NaCl). Para avaliar os resultados foram utilizadas as técnicas de espectrometria de impedância eletroquímica, medidas de potencial e microscópio ótico. Os resultados demonstraram uma forte influência da concentração de silano à resistência à corrosão. Os melhores resultados foram obtidos com a concentração de 5%. Como lacuna do trabalho faltou mensurar o impacto dos filmes estudados com a vida útil do alumínio.

Vera et al. (2010), estudaram os efeitos da deposição do revestimento de Polianilina (PANI) na corrosão do alumínio, em casais galvânicos Al-Cu. Ensaios em 10% de NaCl foram realizados onde a placa de Al-Cu ficou imersa nesta solução. Os resultados foram avaliados utilizando MEV e espectroscopia de absorção atômica. Como resultado deste experimento foi possível observar uma redução dos danos ao alumínio causados pela corrosão por pilha galvânica.

Banczek et al. (2013), avaliaram os efeitos dos tratamentos de SAM (Moléculas auto organizáveis), conversão de cério ou a combinação destes dois, na resistência à corrosão da liga AA3003. Os resultados foram comparados com o tratamento convencional por conversão cromo hexavalente. As amostras foram investigadas pelos métodos de espectrometria de impedância eletroquímica e curvas de polarização anódica em uma solução 0,5 mol/L de

sulfato de sódio com PH de 4,0. Os resultados demonstraram que os tratamentos por SAM apresentaram resistência à corrosão superior ao de conversão de cério. A combinação dos dois tratamentos melhorou a proteção, principalmente influenciada pela absorção do SAM pela liga.

Reboul e Baroux (2011) realizaram uma profunda pesquisa bibliográfica, com o objetivo de resumir os principais riscos de corrosão do Alumínio e suas ligas, levando em conta os fatores de composição química, estrutura metalúrgica, ambiente corrosivo e condições de serviço. Foram apresentados os principais usos do alumínio e suas ligas, bem como os tipos de corrosão e suas principais causas e possíveis soluções para preveni-la. Portanto, faltou no trabalho, testes práticos e laboratoriais que embasassem as teorias apresentadas.

Dzhurinskiy et al. (2012), desenvolveram um estudo sobre o comportamento eletroquímico de vários tipos de revestimentos de proteção, obtidos por pulverização fria de baixa pressão e seu desempenho de resistência à corrosão. Métodos eletroquímicos, tais como: potencial de circuito aberto e polarização potenciodinâmica, foram utilizados em combinação com técnicas de caracterização de materiais para avaliar o desempenho destes revestimentos. As amostras foram submetidas ao teste de corrosão acelerado de câmara de névoa salina por um período de 500 h. A conclusão geral deste estudo é que LPCS pode ser uma solução de proteção à corrosão do alumínio e manutenção na indústria. Entretanto careceu de apresentar mais detalhes sobre a performance dos revestimentos no teste acelerado de névoa salina.

Viomar et al. (2012), realizaram um estudo utilizando o método de caracterização por espectrometria de impedância eletroquímica e polarização potenciodinâmica anódica em meio de Na_2SO_4 0,5 mol/l em pH 4,0. O objetivo foi estudar a proteção à corrosão do alumínio AA 2024-T3 associada ao SAM, após tratamento com desengraxante alcalino moléculas auto organizáveis (*SAM - Self Assembly Monolayer*). Os resultados do presente estudo demonstraram superior resistência à corrosão de camadas formadas por SAM quando aplicado o pré-tratamento com desengraxante. Porém as amostras estudadas não atingiram os resultados esperados. Desta forma faltou apresentar uma maneira de atingir a resistência necessária na aplicação de SAM como inibidor de corrosão.

Arthur et al. (2013), realizaram uma profunda pesquisa bibliográfica com o objetivo de buscar um inibidor de corrosão biodegradável, que não contenha metais pesados e componentes tóxicos. Como é sabido, metais pesados como cromo são largamente

empregados como revestimentos para proteção do alumínio à corrosão. Os estudos encontraram substâncias poliméricas como, por exemplo, gomas vegetais, com boas capacidades de inibir a corrosão. Além de serem ambientalmente e ecologicamente corretos, os produtos têm se mostrados baratos, de fácil acesso no mercado e provenientes de fontes renováveis. O estudo enumerou diversos tipos de materiais poliméricos que podem ser utilizados como alternativas para o combate à corrosão. Entretanto, faltou quantificar os resultados obtidos através de revestimentos híbridos ambientalmente corretos.

Liu et al. (2014), desenvolveram um comparativo de corrosão de uma liga de alumínio exposta em diferentes ambientes, costeiro e rural. As técnicas de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), potencial de circuito aberto (OCP) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram utilizadas neste estudo. Foi observado um nível de corrosão acelerado maior no ambiente costeiro devido à presença de Cl e SO₂ na atmosfera, o que aumentou a corrosão por pites.

Liu et al. (2013), realizaram uma investigação sobre o comportamento corrosivo da liga de alumínio 2A12 no ambiente de Salt Spray neutro, após a remoção do revestimento Al-Clad com diferentes processos. Foram analisadas as alterações morfológicas do material, composição e máxima profundidade de corrosão. Foi observada que o nível de corrosão foi mais acentuado nas primeiras 24 h, e a amostra que apresentou melhor resistência à corrosão foi devido a sua capacidade de absorver o inibidor corrosivo contido no revestimento Al-Clad.

Yan et al. (2013), avaliaram a performance de resistência à corrosão de diferentes revestimentos formados por Polipirrol incorporados a um primer epóxi. Estes continham molibdato, fosfato ou vanadato aplicados na liga AA 2024-T3. Os revestimentos foram estudados por avaliações eletroquímicas, incluindo técnica de exploração de vibração eletrodo (SVET), espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e teste de névoa salina. Os revestimentos apresentaram uma boa performance de inibição da corrosão, tendo o Vanadato atingido os melhores resultados.

Liu, et al. (2013) realizaram um estudo comparativo de proteção à corrosão do alumínio puro e da liga AA7075 em uma solução salina. Foram utilizados revestimentos baseados em silano desenvolvidos pelo processo de sol-gel filmes, as técnicas de varredura potenciodinâmica, medidas de porosidade por Parstat 2273, resistência linear de polarização (LPR), testes de perda de massa, Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microscópio ótico foram utilizadas para avaliar as propriedades de inibição da corrosão das amostras. Os resultados demonstraram que os revestimentos com propriedades, mais hidrofóbicas

mostraram uma capacidade de inibição da corrosão superior aos menos hidrofóbicos. Faltou ao estudo uma maior profundidade na discussão dos resultados e entendimento das diferenças de performance entre os revestimentos estudados.

Zhang et al. (2013), realizaram estudos sobre os impactos da aplicação de compósitos reforçados com fibra na fabricação de aeronaves. Como é sabido as fibras de carbono são mais nobres que o alumínio e o cobre, resultando assim na corrosão galvânica quando estes materiais são aplicados em conjunto sob certas condições ambientais. Neste trabalho foram estudados, sistematicamente, os efeitos de corrosão galvânica entre as fibras e metais menos nobres em condições ácidas e salinas. Os resultados demonstraram que estas condições severas tem um forte impacto na resistência à corrosão destes materiais, principalmente influenciados pelo ambiente que propicia a pilha galvânica.

Abdollahi et al. (2014) utilizaram métodos de varredura potenciodinâmica e 2000 h de ensaio de névoa salina para investigar a resistência à corrosão de revestimentos em alumínio. Os resultados dos testes de varredura potenciodinâmica demonstraram que as proteções de corrosão de revestimentos de filmes híbridos dependem principalmente do teor de silano, do tipo do silano precursor e do tipo de nano partículas. O efeito de proteção do revestimento melhorou pelo aumento da resistência de polarização, em torno de uma década ao substituir precursores de silano, de TEOS (Tetraetil Ortosilicato) para TMOS. Sendo que a incorporação de TiO_2 em comparação com AIOOH nano partículas baseado em base GPTMS (glycidoxypopyl-trimethoxysilane), sendo o principal resultado os revestimentos demonstrarem melhoria no efeito sobre a resistência à polarização. Portanto a incorporação simultânea de nano partículas de TiO_2 e AIOOH levou a um elevado revestimento protetor.

Costa et al. (2014) utilizaram as técnicas de ensaio de corrosão acelerado SO_2 e também o ensaio de polarização, para determinar o melhor revestimento a serem utilizados em tubos trocadores de calor de usinas termo elétricas, que apresentem resistência à corrosão em meios agressivos. Verificou-se que o revestimento de alumínio aplicado pela técnica de *Arc Spray*, apresentou os melhores resultados nos testes realizados, quando comparados com material utilizado atualmente nos trocadores de calor.

Jiang et al. (2015) empregaram os testes de método de tração (*pull-off*), teste acelerado de névoa salina, espectroscopia de impedância eletroquímica e varredura eletroquímica microscópica para avaliar a adesão apropriada e performance de resistência à corrosão de silano, incorporado a revestimentos de epóxi. Os resultados demonstraram um melhor desempenho dos revestimentos que contêm silano nos quesitos de aderência e resistência à

corrosão. Como lacuna deste trabalho faltou avaliar a resistência do revestimento quando o alumínio é submetido a condições de corrosão por pilha galvânica.

Wang et al. (2015), realizaram um estudo sobre o comportamento corrosivo das ligas de alumínio 3A21 e 5A05 em soluções aquosas de cloreto, a pesquisa foi motivada pelo desconhecimento do processo corrosivo destas ligas. Para a análise foram utilizadas as técnicas de polarização eletroquímica e espectroscopia de impedância (EIS), após o material ser exposto a uma solução de 3,5% de NaCl as amostras foram analisadas por microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados demonstraram que a liga 5A05 possui uma maior resistência a corrosão por pites, com alta capacidade de repassivação. O presente estudo mostrou uma lacuna no quesito proteções contra a corrosão, o presente trabalho não propôs solução para aumentar a resistência ou prevenir a corrosão.

Carrino; Napolitano; Sorrentino (2006), desenvolveram um pré-tratamento para o alumínio liga AA2024, aplicados na indústria aeronáutica em severas condições corrosivas. Atualmente os processos utilizados são complexos e envolvem substâncias agressivas e nocivas ao meio ambiente. O tratamento proposto de oxigênio por plasma a frio se demonstrou uma alternativa eficiente, não poluente e econômico. Ele permite a simplificação do processo de proteção anticorrosiva de superfícies de liga de alumínio, bem como a redução dos custos de manufatura. Para o desenvolvimento do presente trabalho foram avaliados um conjunto de variáveis de processo, utilizando a metodologia de Planejamento de Experimentos.

Balasubramanian; Jayabalan; Balasubramanian (2008), aplicaram as técnicas de Planejamento de Experimentos e Superfície de resposta para melhorar os parâmetros de um processo de solda TIG. Neste estudo um modelo matemático foi desenvolvido para prever a taxa de corrosão durante a solda. No planejamento foram utilizados quatro fatores, cinco níveis e um ponto central para minimizar as condições do experimento. O modelo desenvolvido foi otimizado para assim atingir a taxa mínima de corrosão na zona de fusão da solda.

Elangovan; Balasubramanian; Babu (2008), desenvolveram um estudo utilizando a metodologia DOE, superfície de resposta (RSM) e análise de variância (ANOVA), com quatro fatores e cinco níveis de planejamento. O objetivo foi desenvolver uma relação matemática para obter os parâmetros ideais para o processo FSW (soldagem por fricção), que maximizem a resistência à tração de juntas de liga de alumínio AA2219. Uma relação matemática foi desenvolvida para prever a resistência à tração, para solda por fricção, para

juntas de liga de alumínio AA2219, pela incorporação de parâmetros de soldagem e perfis de ferramentas, utilizando as ferramentas estatísticas, tais como: projeto de experimentos, análise de variância e análise de regressão.

Bingöl e Zor (2012) aplicaram a metodologia estatística de superfícies de resposta (RSM), e análise da variância (ANOVA) para avaliar a taxa de corrosão do alumínio. O objetivo foi analisar os efeitos da temperatura e concentração do decilbenzeno sulfonato de sódio (SDBS) em uma solução ácido clorídrico (HCl), para corrosão do alumínio. O RSM foi utilizado para otimizar a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) do alumínio, usando o método de polarização potenciodinâmica e avaliar os efeitos e as interações entre temperatura e a concentração de SDBS. Utilizando as metodologias estáticas de RSM e ANOVA foi possível determinar os níveis de temperatura e concentração do SDBS, para obter uma proteção à corrosão do alumínio mais elevada. A menor densidade de corrente (i_{corr}) foi encontrada com a concentração SDBS à 130 mg/l e a temperatura a 24 ° C.

Singh e Yeh (2012) empregaram uma nova abordagem de avaliação de desempenho, análise relacional cinza (GRA), em um projeto de experimentos. O objetivo do estudo foi avaliar a eficácia de otimizar várias características de um processo de híbrido de fabricação da liga AA6061. Foram avaliados 7 fatores de controle em um arranjo ortogonal L18 ($2^1 \times 3^7$), os resultados indicaram os parâmetros de processo ideais, o que confirma a efetividade da abordagem proposta.

Rastkerdar; Amanian; Saatchi (2013), utilizou o método Taguchi em um modelo de projeto de experimentos (DOE), para otimizar os parâmetros de um processo de solda aumentando a resistência à corrosão em soldas liga AA5083-H18. Foi empregado um arranjo L9 (3^4) ortogonal do desenho Taguchi, que consiste em nove experimentos para quatro parâmetros: corrente de pico (P), corrente de base (B), a percentagem de pulso no tempo foi utilizada (T) e frequência de pulso (F) com três níveis. A resistência a pites de corrosão em uma solução de 3,5 % de NaCl foi avaliada por meio de ensaios de polarização anódica à temperatura ambiente e o cálculo da largura da região passiva. Os resultados demonstraram que os quatro fatores possuem influência na corrosão da liga estudada e, com a aplicação dos experimentos utilizando a metodologia Taguchi, foi possível determinar a melhor configuração do equipamento para melhorar a resistência à corrosão. Faltou mensurar os ganhos e benefícios deste *setup* de parâmetros.

Rahimi et al. (2013), estudaram as variáveis e parâmetros para obtenção de camadas de nano composites sol-gel como anticorrosivo do alumínio AA5083. A metodologia

estatística de Planejamento de experimento baseado em Taguchi ortogonal e análise da variância (ANOVA), foram utilizados para analisar diversos parâmetros, onde a variável de resposta foi a densidade de corrente. A estrutura, morfologia da superfície e composição dos revestimentos híbridos foram estudados usando MEV, AFM e ATR / FTIR, respectivamente. Resistência à corrosão dos revestimentos foi examinada usando polarização potenciodinâmica e EIS. Os resultados demonstraram que com a utilização de parâmetros adequados podemos obter revestimentos protetivos híbridos, que aumentam a proteção à corrosão.

Olakanmi (2014) empregou neste estudo, as técnicas de planejamento de experimentos método Taguchi, para determinar os parâmetros ótimos de um processo de revestimento de alumínio puro, por *spray* a frio, assistido a laser. Foram avaliados 4 fatores (temperatura de deposição, velocidade transversal, taxa de alimentação de pó, e pressão de operação) em 4 níveis diferentes. Como resultado do estudo foram obtidos os melhores parâmetros para os fatores de processo, desta forma, melhorando a produtividade e estabilidade dos revestimentos de alumínio puro, além de atingir níveis de variabilidade que reduziram as rejeições e custos de garantia.

Aigbodion, Popoola e Fatoba (2015), aplicaram as técnicas de Planejamento de experimento e análise de variância ANOVA para estudar o comportamento corrosivo em uma solução de H_2SO_4 e HCl. O desenho fatorial da experiência pode ser empregado com sucesso para descrever o comportamento em fase de corrosão. O modelo de equações lineares desenvolvido pode ser utilizado na predição da taxa de corrosão nas condições experimentais selecionadas. Com o estudo pode-se chegar no resultado que as ligas laser 20Al-20Sn-60Ti de aço carbono, podem ser usadas para melhorar a dureza superficial e conseqüentemente a resistência à corrosão.

Lourenço et al. (2015), desenvolveram um estudo sobre os fatores de manufaturabilidade da liga AA7075 que impactam na ocorrência de corrosão. As etapas de produção consideradas foram: usinagem, rebarbação e teste de líquido penetrante. Os fatores significativos foram definidos para cada etapa de processo em separado e, com isto, foi elaborado um projeto experimental onde a variável de resposta é a quantidade de corrosão obtida, através de análise por imagem. Foi constatado que os fatores mais significativos estavam na etapa de usinagem. Os resultados estatísticos demonstraram que as melhores condições para evitar a corrosão foram: baixa concentração de cloreto no líquido de arrefecimento (etapa de usinagem), baixa dureza do fluido (fase usinagem) de arrefecimento e de alta condutividade da água de lavagem (penetrante fase líquida).

Rambabu et al. (2015), aplicaram as técnicas de projeto de experimentos para desenvolver um modelo matemático para prever a resistência à corrosão da liga AA2219, soldada pelo processo de fricção. Este estudo avaliou os parâmetros de processo em um modelo com quatro fatores em cinco níveis, para minimizar as condições experimentais. Os resultados demonstraram o fator e nível com maior significância, foi determinado o modelo matemático e aperfeiçoado o processo de solda melhorando assim sua performance de resistência a corrosão.

Arjmand, Wang e Zhang (2016), pesquisaram a performance de inibição da corrosão em uma liga de aço carbono utilizando a estratégia de projeto de experimentos. Com a utilização desta estratégia foram utilizados apenas 30 experimentos. A corrosão foi investigada em uma solução de cloreto de sódio. Como resultado, foi obtido o valor ideal para cada parâmetro, baseados nos resultados da matriz do projeto de experimentos, com o menor índice de corrosão obtido.

Asghari et al. (2016), empregaram uma abordagem Taguchi com arranjo ortogonal L16 e 4 fatores e 4 níveis. Neste trabalho foi estudado desempenho de inibição à corrosão de uma mistura de três componentes inibidores. A variável de resposta escolhida foi a eficiência de inibição. Essa foi medida pelas técnicas de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios X por dispersão de energia. A partir da análise dos resultados do experimento, foi possível determinar as melhores condições de eficiência de inibição à corrosão.

Calabrese et al. (2016), investigaram o impacto de uma camada intermediária adesiva em juntas de alumínio que pode influenciar no desempenho da resistência à corrosão. Estas juntas foram expostas ao teste acelerado de névoa salina durante um período de 15 semanas. Para análise dos resultados, foram utilizadas as técnicas de Planejamento de Experimento e ANOVA. Os resultados evidenciaram que a presença da camada adesiva flexível deu uma vantagem significativa na resistência a um ataque corrosivo, mas sem impactar nas características à resistência mecânica.

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O Alumínio e suas ligas são amplamente empregados em diversos campos tal como indústrias, construção, engenharia elétrica e transporte, devido a suas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão. São leves, duráveis e infinitamente recicláveis, o que

proporciona um profundo impacto da reciclagem sobre o meio ambiente. O processo de reciclagem do alumínio utiliza 72% menos de energia e emissões de gases, em comparação com o processo de fabricação primário. Hoje 75% de todo alumínio produzido ainda continua em uso. Entretanto o alumínio e suas ligas são suscetíveis a corrosões atmosféricas, principalmente sob a forma de pites, corrosão intergranular e corrosão sob tensão. Estudos ao ar livre em diferentes ambientes e experimentos acelerados em laboratório têm sido realizados para entender a influência do ambiente atmosférico no comportamento da corrosão do alumínio. Alguns testes podem ser utilizados para entendermos o comportamento da corrosão em alumínio, tais como corrosão por íons (ex: Cl, SO₂, NO_x, e CO₂), câmara úmida e *Salt Spray* (LIU et al., 2014).

Ligas de alumínio possuem em sua composição química elementos que são adicionados ao alumínio puro, com isto é possível melhorar suas características como resistência mecânica e a corrosão como exemplo. Estes elementos adicionados ao alumínio puro incluem ferro, silício, cobre, magnésio, manganês e zinco em níveis que combinados podem chegar a 15 por cento da liga em peso segundo a *Aluminum Association* (2015).

Conforme Reboul e Baroux (2011) o alumínio e suas ligas possuem uma nomenclatura formada por quatro dígitos, exemplo: 1050, 3003, 7075, etc. O primeiro dígito de um a oito indica uma classe geral, ou série, caracterizada por seus principais elementos de liga, Figura 1.

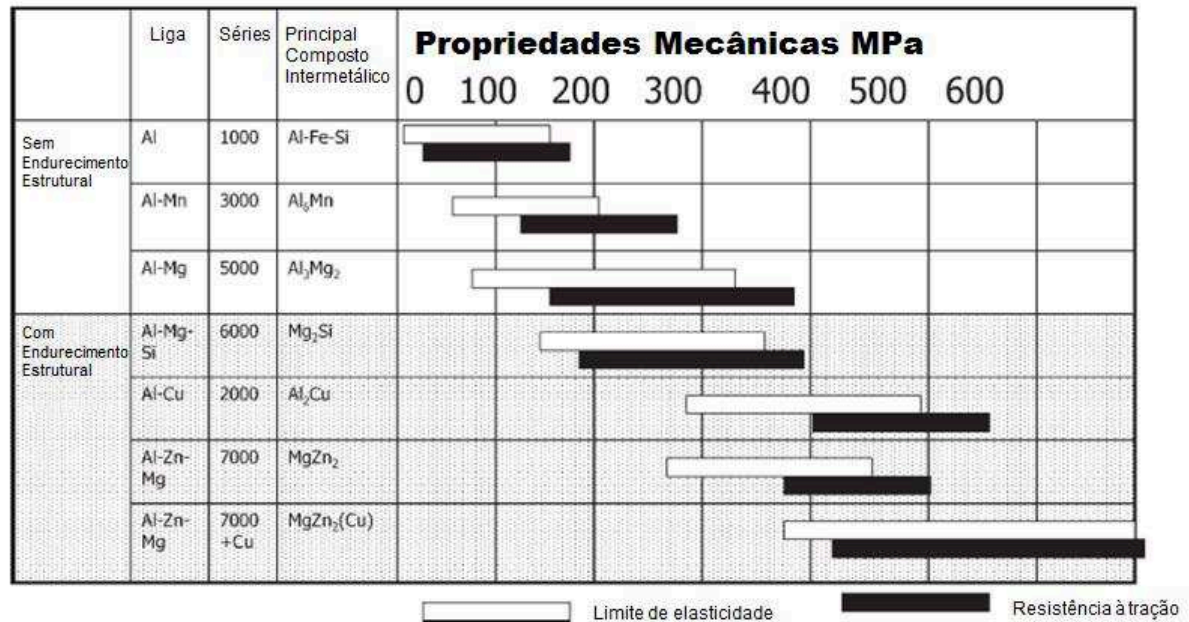
Em relação às ligas estudadas, a liga A8006 apresenta 99,35% de pureza em relação ao alumínio, sendo altamente resistente à corrosão. As combinações de Al-Si-Mg trazem excelentes características de resistência à corrosão e excelentes propriedades mecânicas. A liga série 6xxx de Al-Mg-Si, é conhecida por ser versátil, tem características boas para tratamento térmico e conformação e ainda possui alta resistência à corrosão. Este material é normalmente empregado na fabricação de trocadores de calor, estruturas de caminhões e barcos.

Para a série liga 1xxx, os dois últimos dígitos indicam a pureza do alumínio (1050=99.5% Al, 1070=99.7% Al, 1100=99% Al). Nas outras séries os últimos dois dígitos especificam a composição química da liga, esta é regulamentada pela *Aluminum Association*, (REBOUL; BAROUX, 2011)

A Figura 1, mostra as sete famílias de alumínio divididas com tratamento térmico e sem tratamento térmico. Ela demonstra o composto intermetálico que compõe cada liga e suas respectivas resistências à tração. Pode-se observar que a liga série 1000 possui a menor

resistência mecânica, enquanto que a liga 7000 formada por Zn-Mg-Cu atingiu a maior dureza e conseqüentemente resistência mecânica.

Figura 1 - Série da liga de alumínio - Propriedades mecânicas típicas



Fonte: Adaptado de Reboul e Baroux (2011)

2.2 PROPRIEDADES DO ALUMINIO

A larga utilização do alumínio e suas ligas se deve, principalmente, pela versatilidade em suas propriedades mecânicas e ao excelente desempenho na maioria das aplicações. Podemos citar como principais características do alumínio, (REBOUL; BAROUX, 2011):

- Leveza, sua densidade é 2,7 g/cm³, o que significa ser três vezes mais leve que o aço ou o cobre.
- Condutividade elétrica e boa resistência para aplicações externas como redes de distribuição.
- Condutividade térmica para a produção de trocadores de calor.
- Facilidade de conformação, leveza e resistência à corrosão.
- Material não tóxico, possui fácil conformação e reciclável. Devido a isto é possível obter camadas finas para embalagens de alimentos.
- Boa resistência à corrosão ocorre quando aplicado corretamente.

O seu grau de pureza possui uma influência direta nas propriedades mecânicas do alumínio, quanto maior a pureza menor será a resistência ao escoamento e tração e menor será o alongamento, conforme mostra a Tabela 4. Entretanto, com o acréscimo de outras ligas na composição do alumínio geralmente temos uma redução na resistência à corrosão do alumínio, (PEREIRA, 2010).

2.3 CORROSÃO DO ALUMÍNIO

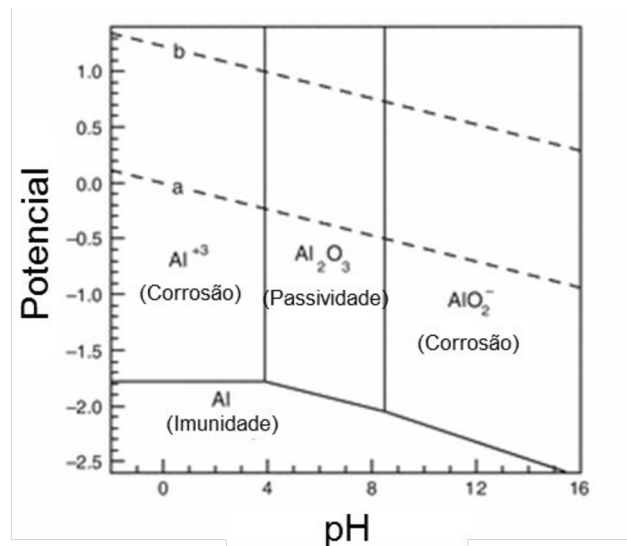
Por definição a corrosão é caracterizada pela degradação ou destruição do material devido à uma reação química, física ou eletroquímica com o meio ambiente e/ou materiais de diferentes potenciais eletroquímicos.

Em função de o alumínio possuir uma camada de óxido formada naturalmente em sua superfície, se atribui a ele uma elevada resistência à corrosão. Na aplicação industrial a atmosfera é mais agressiva e, frequentemente, associada a esforços mecânicos. Conseqüentemente, os filmes de óxidos não oferecem uma resistência a longo prazo, podendo sofrer corrosão em meios ácidos ou alcalinos. Para este tipo de aplicação é recomendada a utilização de revestimentos protetores. O tipo de corrosão mais comum em alumínio e suas ligas é a corrosão por pite. Este tipo de corrosão localizada é a forma mais destruidora e acontece, principalmente, em atmosferas contaminadas em cloreto. Em geral se desenvolve em três estágios: identificados com a quebra do filme passivo, crescimento de pites metaestáveis e, por fim, crescimento de pites estáveis. Uma vez iniciado o processo de corrosão, pode ocorrer delaminação e perda da aderência da tinta ao substrato. Em razão disso, ligas de alumínio são submetidas a tratamentos de superfície antes da pintura, particularmente àqueles conhecidos como tratamentos de conversão, que têm a finalidade de retardar a degradação do sistema substrato metálico/revestimento. “Estes processos podem atuar apenas como promotores de adesão entre o substrato e a camada orgânica (tinta), bem como promover inibição do mecanismo de ataque corrosivo do metal.” (SZURKALO, 2009, p.11).

A posição do alumínio na série termodinâmica dos elementos está entre aqueles que possuem forte relação para a oxidação. Na sua forma mais usual, se forma uma camada de óxido acima da superfície de contato do alumínio. Este fenômeno cria uma película protetora que isola o material a partir de ambientes agressivos. Uma vez que o alumínio é um material passivo, sua resistência à corrosão está relacionada à camada de óxido protetora. Na Figura 2,

o diagrama de Pourbaix para o alumínio, demonstra que o filme de óxido é formado em uma atmosfera onde o pH esteja entre 4 a 9. Entretanto o filme se dissolve em ambientes ácidos (pH<4) para formar o Al^{3+} , e em ambientes alcalinos (pH>9) para formar o AlO_2^- . A resistência à corrosão deste material está relacionada diretamente com a formação e manutenção do filme óxido protetivo, uma vez que se trata de uma liga de metal passivo. A camada superficial de filme óxido se forma e se mantém estável em um ambiente atmosférico com pH entre 4 e 9, sendo extremamente recomendado sua aplicação nestas condições, (REBOUL; BAROUX, 2011).

Figura 2 - Diagrama de Pourbaix



Fonte: Adaptado de McCafferty (2010)

Segundo Reboul e Baroux (2011), diversos resultados de testes de resistência a corrosão, confirmam uma boa performance de resistência que é alcançada nas seguintes condições:

- Sem corrosão em ácido nítrico concentrado.
- Sem corrosão em dissilicato de sódio.
- Baixa taxa de corrosão em soluções de amônia.
- Baixa taxa de corrosão em soluções de ácido acético.

A tendência natural do alumínio é de voltar ao seu estado de forma de óxido, ou em outras palavras, corroer. Quando aplicado em atmosferas com condições naturais, a única condição para a corrosão ocorrer é quando o metal está coberto por um filme úmido.

2.3.1 Passividade do Alumínio

O Alumínio é um material que, quando exposto a atmosfera, em condições normais, está pronto para oxidar, o que não significa que possui baixa resistência à corrosão. A tabela abaixo mostra um estudo realizado pela *International Standards Organisation ISO*, onde foi solicitado a um grupo de cientistas a mensurar a corrosão atmosférica de metais comuns. Este estudo foi realizado em amostras de alumínio, aço, zinco e cobre que foram expostas a testes de campo localizados em cinco continentes (12 países em um total de 48 campos de testes utilizados). O resultado final foi resumido na Tabela 5, que demonstra que a média de corrosão atmosférica do alumínio (liga 1050) é em torno de 100 vezes menor que uma chapa de aço, 0,5 $\mu\text{m}/\text{ano}$ na média sendo mínimo de 0,07 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (região seca no deserto) e máximo de 1,7 $\mu\text{m}/\text{ano}$, em uma atmosfera marítima úmida e quente, (REBOUL; BAROUX, 2011).

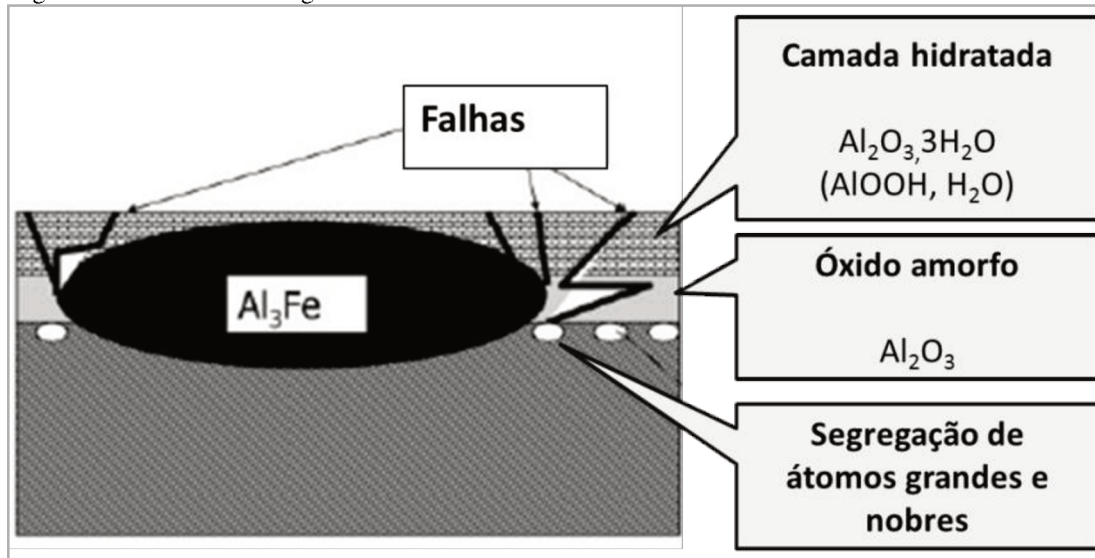
Tabela 1 - Comparativo da corrosão Al, Fe, Zn e Cu

$\mu\text{m}/\text{ano}$	Média	Min.	Máx.
Al	0,5	0,07	1,7
Fe	47,7	0,82	373
Zn	2,26	0,44	17,5
Cu	1,66	0,09	6,16

Fonte: Adaptado de ISOCORRAG

Segundo Reboul e Baroux (2011), normalmente o alumínio é protegido por uma camada amorfa de óxido de alumina (Al_2O_3) de 2 a 4 nm de espessura. Esta aumenta em função da temperatura, por exemplo, a espessura pode dobrar durante o processo de tratamento térmico (~24 h a 450 $^{\circ}\text{C}$). Esta fina camada natural de óxido possui uma grande quantidade de defeitos, principalmente formados por micro falhas de 10nm. Uma camada formada em um meio úmido é normalmente menos protetiva do que uma formada em um meio seco. A perda de proteção é automaticamente compensada com a formação de uma camada mais espessa. Isto corresponde a um novo equilíbrio entre o metal e o meio úmido.

Figura 3 - Passividade da liga de alumínio



Fonte: Adaptado de Reboul e Baroux (2011).

A Figura 3, mostra esquematicamente a camada de filme óxido de alumina formada sobre uma liga de alumínio. Esta possui em adição ao alumínio puro, impurezas e outras ligas em solução sólida precipitações intermetálicas. Elementos mais ativos, como o lítio irá oxidar antes do alumínio e, assim, formar um filme com uma proteção reduzida. Elementos mais nobres e volumosos como magnésio e o cobre também podem trazer impactos à resistência a corrosão. O magnésio se acumula na camada de filme óxido durante o processo de tratamento térmico e recozimento. Isto não traz nenhum efeito negativo a resistência à corrosão, porém, poderá impactar na adesão dos revestimentos protetivos. Desta forma, estes irão passar para o óxido de camada somente acima de um limiar específico para cada elemento. Assim, como resultado, a película de óxido em ligas de alumínio é praticamente pura, (REBOUL; BAROUX, 2011).

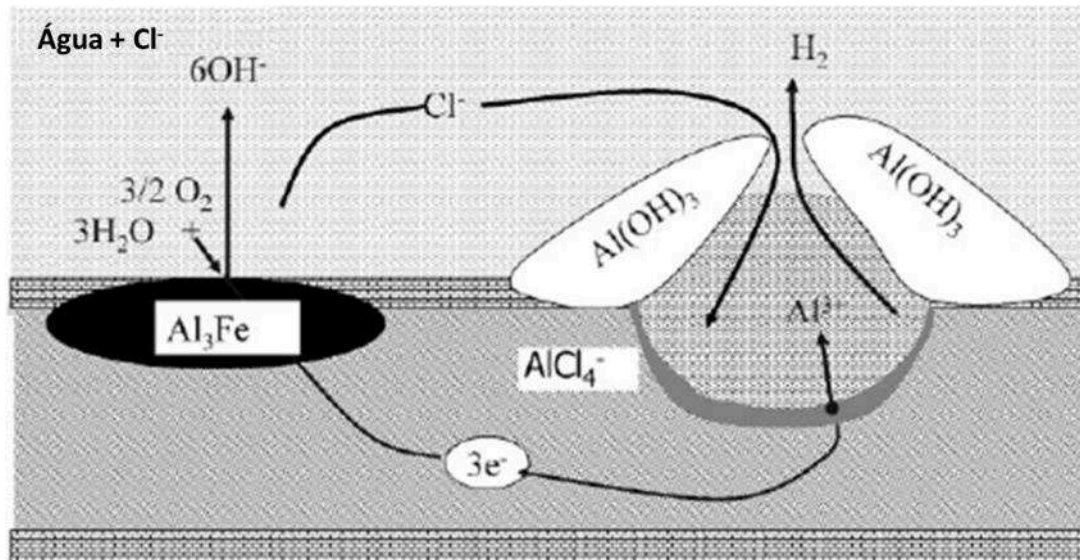
2.3.2 Corrosão por Pites

Segundo Picon et al. (2010), em uma solução com alta concentração de cloreto de sódio, muitos metais sofrem com a corrosão por pites. Entre eles podemos incluir o alumínio e suas ligas, aços inoxidáveis, ferro, níquel, cobre, magnésio, zircônio, estanho, cádmio, entre outros. Podemos denominar corrosão por pites como um ataque muito localizado onde a destruição é concentrada em áreas pequenas, da ordem de milímetros quadrados ou menos, resultando assim em pequenos furos que penetram o metal, enquanto outras partes da

superfície continuam intactas permanecendo passiva. O aparecimento da corrosão por pites está diretamente relacionado com a presença de ânions agressivos no meio. Em geral o íon cloreto é um dos mais agressivos de todos e um dos mais abundantes na atmosfera, apesar disto o mesmo metal pode mostrar diferentes potenciais de pite em diferentes ânions. Em soluções de alta concentração de cloretos, o pite é caracterizado por um potencial mínimo, chamado de potencial por pite. Este é uma função da composição do meio, da concentração do íon agressivo, da temperatura, da composição da liga, do tratamento da superfície, dentre outros.

Para o alumínio a corrosão por pites geralmente ocorre em atmosferas que contenham o cloreto. Entretanto, somente a presença de cloreto não é suficiente para a ocorrência de corrosão por pites. É necessário, também, que haja a presença de um oxidante. Neste caso, podemos dizer que o oxigênio dissolvido é o oxidante mais comum e em abundância na natureza. A Figura 4, mostra que a reação catódica controla a iniciação da corrosão por pites e o fenômeno de propagação. Quando não existe o fenômeno da polarização, poucos pites irão se propagar, somente em pontos isolados. Durante o processo de propagação dos pites a solução de cloreto aumenta a sua concentração. Isso ocorre devido ao transporte de corrente entre o eletrólito que é principalmente assumido pela sua maior mobilidade dos íons de cloreto. Esta solução concentrada de cloretos acumula pites ativos, um filme complexo de cloreto substitui o filme óxido passivo. Esta solução complexa é uma condição necessária para a propagação dos pites. Com isso os íons de Al^{3+} gerados na região do anodo ativo onde os pites irão hidrolisar, a hidrólise do Al^{3+} consome os íons OH^- resultando em uma solução ácida interna que ativa os pites. A Al^{3+} hidrólise acontece dentro do líquido neutro, assim isto irá formar uma volumosa solução de hidróxido de alumina branca, o que irá restringir a migração entre os pites e o volume líquido, o que irá criar uma solução agressiva dentro dos pites. Ambos os fenômenos formam uma solução agressiva rica em ácido e cloreto, contribuindo para manter os pites ativos. Como resultado disto a corrosão por pite do alumínio é chamado de fenômeno auto catalítico, (REBOUL; BAROUX, 2011).

Figura 4 - Propagação dos Pites



Fonte: Adaptado de Reboul e Baroux (2011)

O processo de propagação dos pites é interrompido quando ocorre a diminuição da corrente de corrosão e o complexo da solução de cloreto não pode ser renovada rápido o suficiente, para manter os pites. A camada de cloreto é dissolvida e substituída pelo filme passivo óxido. A solução agressiva depositada dentro dos pites é dissolvida no volume da solução, terminando assim o processo de propagação dos pites. Entretanto esse processo pode ser iniciado caso haja um ambiente favorável novamente.

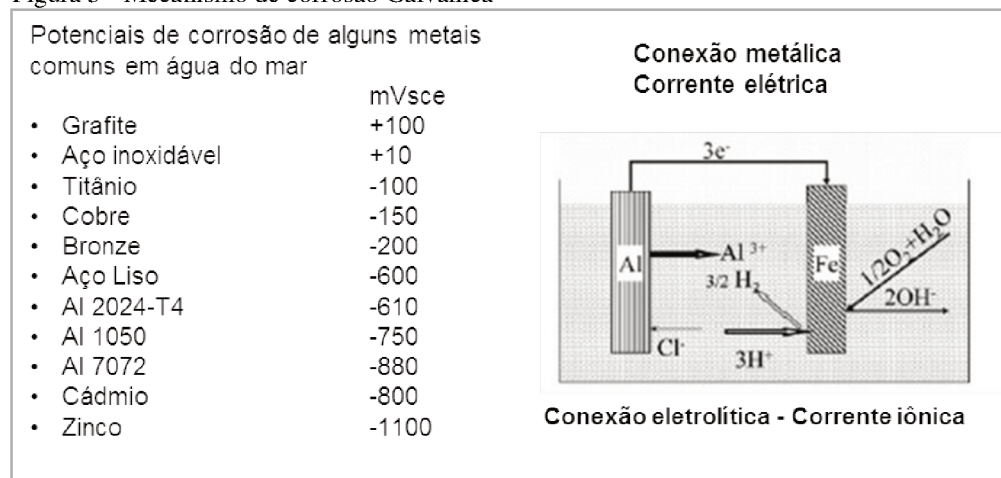
2.3.3 Corrosão Galvânica

A corrosão galvânica é reconhecida na literatura acadêmica como o ponto fraco do alumínio, isto se deve principalmente pela sua posição na tabela periódica. O Alumínio é anódico para maior parte das ligas industriais: Aço carbono, inox, cobre, grafite dentre outras podem ser incluídos na lista de materiais catódicos que quando estão em contato com o alumínio em ambientes agressivos podem incrementar e acelerar o processos corrosivos por pilha galvânica. Uma pilha galvânica é formada quando dois diferentes metais estão em contato elétrico no mesmo meio eletrolítico. Como exemplo quando alumínio e cobre se encontram em contato, é formada uma pilha galvânica que gera uma corrente consumindo a maior parte anódica destes dois metais. Uma vez que o alumínio é um metal anódico em comparação com a maior parte das ligas e metais, é geralmente o metal de sacrifício neste tipo de montagem, (REBOUL; BAROUX, 2011). Esta pode ser uma das formas mais comuns e

frequentes de corrosão na natureza, bem como um dos fenômenos mais destrutivos, onde um metal sofre corrosão, preferencialmente em relação ao outro.

A Figura 5 revela o mecanismo de corrosão bem como a posição potencial do alumínio em relação aos outros metais. Podemos verificar que o cobre possui um potencial de -150 mVse e o alumínio A 7072 de -880 mVse. Desta forma, se houver uma conexão eletrolítica entre estes dois materiais em um meio eletrolítico, o alumínio seria o anodo e o cobre catodo. Como o alumínio possui um potencial negativo maior, ele cederia íons nesta combinação e conseqüentemente ocorreria a corrosão galvânica.

Figura 5 - Mecanismo de corrosão Galvânica

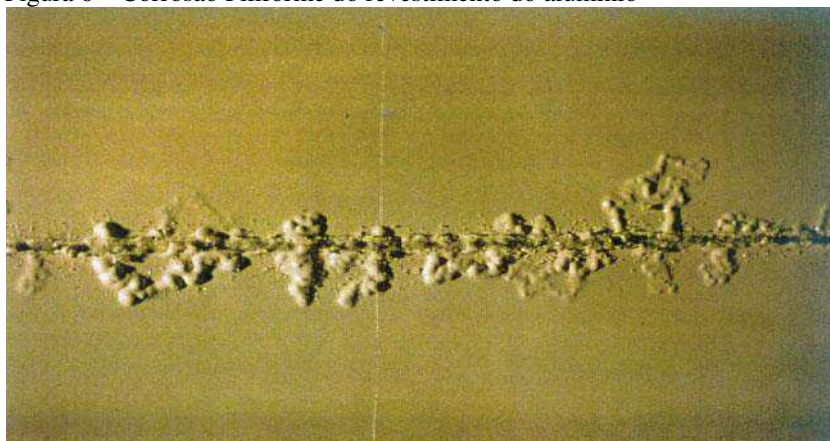


Fonte: Adaptado de Reboul e Baroux (2011)

2.3.4 Corrosão Filiforme

Segundo Reboul e Baroux (2011), a corrosão Filiforme é uma forma de corrosão específica que ataca o revestimento dos materiais, conforme pode ser visto na Figura 6. Este tipo de corrosão é muito comum em ambientes marítimos muito úmidos. Ela se inicia em defeitos dos revestimentos, se propagando em secções transversais em formato de fios de 0,1 milímetros de largura e alguns milímetros de comprimento.

Figura 6 – Corrosão Filiforme do revestimento do alumínio



Fonte: Reboul e Baroux (2011)

2.3.5 Corrosão sob tensão mecânica

Uma outra forma de corrosão é a corrosão sob tensão, ela ocorre quando o material está simultaneamente sob tensão e exposto a um ambiente corrosivo. As tensões não necessitam ser muito altas em relação ao limite de escoamento do material, podem ser tensões residuais do processo de fabricação, tais como dobra conformação e solda. Durante o processo de corrosão praticamente não se observa a perda de massa do material, o que é um indicio comum em outros tipos de corrosão. Desta forma, o material permanece em bom aspecto até que a fratura ocorra (REBOUL; BAROUX, 2011).

2.4 ENSAIOS ACELERADOS DE CORROSÃO

Trocadores de calor são expostos durante sua vida útil aos mais variados meios agressivos, de modo que é muito difícil simular estas condições em um teste de laboratório.

Portanto, ensaios acelerados de corrosão são utilizados para simular os efeitos de corrosão, em um ambiente laboratorial controlado. Estes testes permitem simular um longo período de uso ou serviço, como por exemplo, 400 horas de um ensaio pode representar de 5 a 10 anos de uso da peça. O teste de névoa salina é um dos mais aplicados testes acelerados em uso. Para este, é usado uma câmara de vapores que vaporiza uma solução de cloreto de sódio a 5% sobre o corpo de prova, por um tempo específico, temperatura e pH controlados.

Dzhurinskiy et al. (2012), Liu et al. (2013), Abdollahi et al. (2014), Jiang et al. (2015) e Costa et al. (2014), utilizaram o ensaio de névoa salina para investigar a resistência à

corrosão do alumínio e suas ligas. Desta forma, quando um material ou revestimento apresenta um desempenho superior a outro, durante o ensaio, isto indica com uma boa certeza que este material terá uma durabilidade superior quando aplicado em campo.

Bajat et al. (2010), Banczek et al. (2013), Viomar et al. (2012), Liu et al. (2014) e Wang et al. (2015), aplicaram a técnica de espectrometria de impedância eletroquímica e curvas de polarização em uma solução com diferentes concentrações de cloreto de sódio (NaCl) para avaliar a eficiência de diferentes filmes protetores à corrosão do alumínio. Este é um teste de corrosão que produz uma rápida avaliação da característica da durabilidade à corrosão. Nele é aplicado ao corpo de prova a ser testado uma corrente de densidade anódica baixa em um eletrólito específico por um período de tempo predeterminado. O eletrólito é basicamente escolhido em relação ao metal base envolvido e o tipo de teste desejado. Apesar deste teste ter um uso limitado no meio industrial, o mesmo tem uma boa aceitação como um método de pesquisa. Sua principal desvantagem em relação ao teste acelerado de névoa salina é devido ao teste não representar uma simulação real da atmosfera corrosiva, encontrada no ambiente de aplicação.

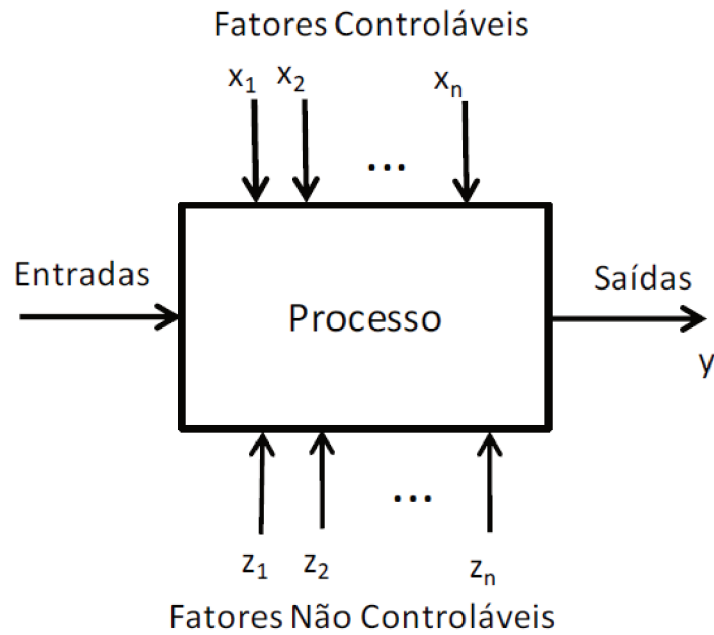
2.5 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO DE EXPERIMENTOS

O planejamento de experimento é uma abordagem sistemática e rigorosa para soluções de problemas, esta metodologia aplica princípios e técnicas de coleta de dados e análise estatística suportando conclusões de engenharia. O Planejamento fatorial é uma das mais utilizadas das variadas técnicas de planejamento de experimentos, este método permite que os fatores sejam variados simultaneamente em todos os seus níveis (MONTGOMERY, 2013).

Os planejamentos fatoriais são os projetos mais eficientes para estudar o efeito de um conjunto de dois ou mais fatores. Uns dos planejamentos mais utilizados são os fatoriais de 3^k , o que permite estudar o efeito de k fatores, cada um em três níveis, (MONTGOMERY, 2013).

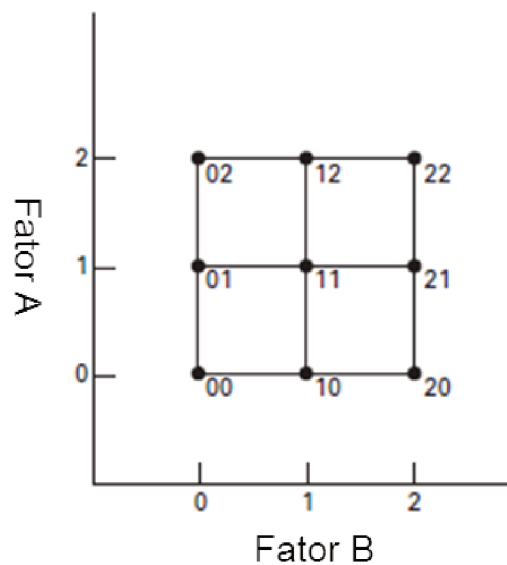
Normalmente estes experimentos são utilizados para avaliar sistemas e processos, a Figura 7 representa um modelo onde as entradas são transformadas pelo processo, estas podem ser influenciadas por fatores variáveis controláveis ou incontroláveis. Em um planejamento fatorial devemos selecionar os fatores controláveis para serem simulados.

Figura 7 - Modelo geral de um processo ou sistema



Fonte: Adaptado de Montgomery (2013).

Em um projeto de planejamento fatorial 3^k , os fatores são frequentemente denotados em níveis baixo, intermediário e alto por -1 , 0 e $+1$, respectivamente. O desenho 3^2 representado na Figura 8 mostra o fator A no eixo X e o fator B no eixo Y, onde os resultados da variável de resposta são apresentados nos pontos do gráfico.

Figura 8 - Combinações de tratamento em um projeto 3^2 

Fonte: Adaptado de Montgomery (2013).

Para o estudo da variância utilizamos a ferramenta estatística de análise de variância, conhecida também por ANOVA, com ela é possível medir a significância, os efeitos e as interações dos fatores em relação a variável de resposta. A análise de variância é uma técnica estatística muito utilizada para avaliar o grau de confiança de dados. Com a determinação da variabilidade a técnica permite a análise indireta dos dados. Em um planejamento fatorial este estudo deve considerar a análise de confiança dos resultados. A análise fornece a variância dos fatores, a interação entre eles e seus efeitos, o nível de significância e seu erro. Desta forma é possível o entendimento da fonte e a magnitude de variância, sendo possível prever condições operacionais mais robustas (ROY, 2010).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 MATERIAIS

Neste trabalho foram utilizados corpos de prova de alumínio liga AA8006 e tubo de cobre liga C12200, cuja composição química está demonstrada nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Composição química alumínio.

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zi	Outros	Quantidade mínima de Alumínio
8006	0,4	1,2-2	0,1	0,3-1,0	0,1	-	0,1	0,05	99,35

Fonte: Adaptado pelo autor Companhia Brasileira de Alumínio.

Tabela 3 - Composição química cobre.

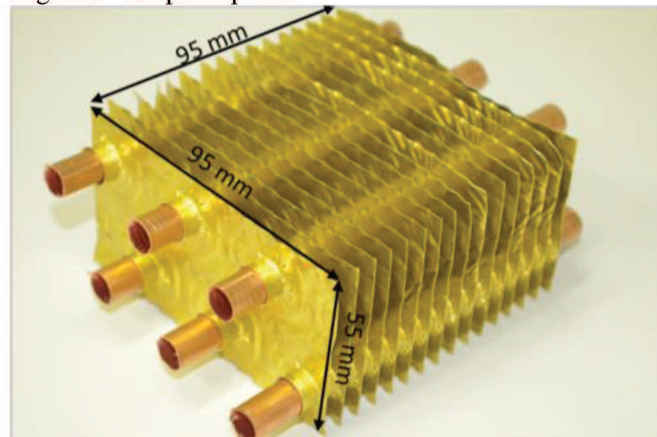
Liga		Composição	
UNS-C12200	Cobre Fosforado	Cu	P
		99,9 % mínimo	0,015 a 0,040%

Fonte: Adaptado pelo autor Termomecânica.

3.2 PREPARAÇÃO CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova usados neste experimento foram confeccionados como miniaturas representativas dos trocadores, conforme a Figura 09.

Figura 9 - Corpo de prova.



Fonte: Autor

Os corpos de prova foram produzidos utilizando o mesmo processo de fabricação adotado para os produtos comerciais, conforme Figura 10. Inicialmente o alumínio foi conformado em uma prensa excêntrica, onde foram estampadas as aletas. Na sequência, os tubos de cobre passaram pelo processo de endireitamento e corte para serem montados manualmente nas aletas e expandidos em uma prensa. Este procedimento gera a interferência mecânica de 0,127 mm entre a aleta de alumínio e o tubo de cobre, o que origina o contato elétrico e mecânico entre os materiais, o que causa o diferencial de potencial eletroquímico que provoca a corrosão. Ao final da fabricação os itens onde o planejamento do experimento selecionou a adição de pintura, passaram pelo processo de deposição eletrostática e por forno de cura.

Figura 10 - Fluxo de fabricação dos corpos de prova



Fonte: Autor

3.3 ENSAIOS DE NÉVOA SALINA

Para realização dos testes acelerados de corrosão foi utilizado uma câmara de vaporização de névoa salina da marca Equilam de seiscentos litros de capacidade, Figura 11.

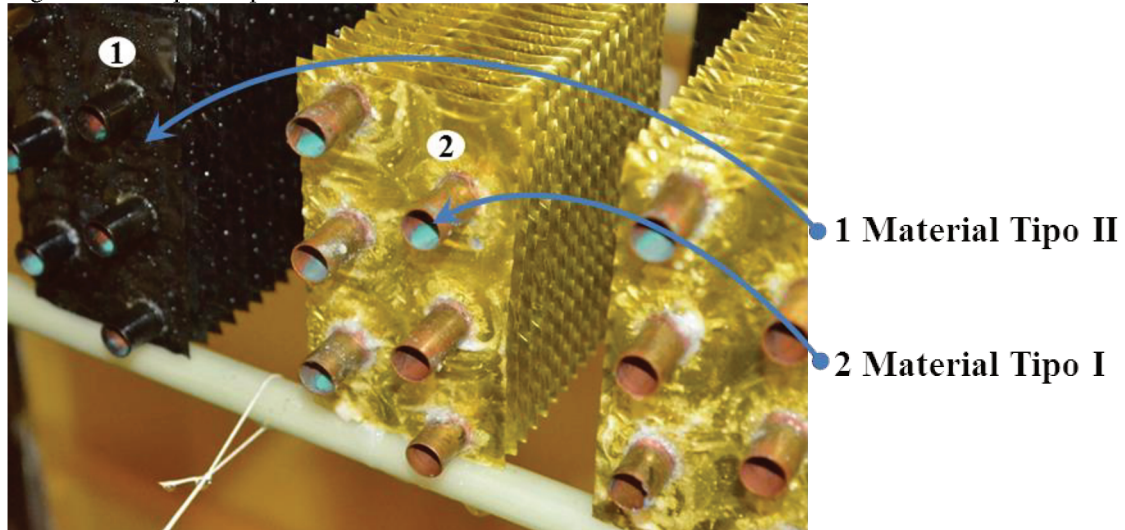
Figura 11 - Câmara de teste acelerado de névoa salina



Fonte: Autor

Os ensaios foram realizados conforme a norma técnica ASTM B117 equivalente a NBR-8094 (ABNT) que especifica uma solução de cloreto de sódio a 5% de concentração, vaporizada sobre os corpos de prova, a uma temperatura controlada entre 35°C e 50°C e pH de 6,5 a 7,2. Durante a exposição a névoa os corpos de prova ficaram na posição vertical conforme Figura 12.

Figura 12 - Corpos de prova durante o teste acelerado de névoa salina.



Fonte: Autor

O teste de corrosão superficial é feito por meio da inspeção visual da superfície da amostra, realizada a cada 24 horas, com o intuito de encontrar pontos de oxidação, degradação do material ou deslocamento da pintura. As Figuras 13 (a) e 13 (c) apresentam dois corpos de prova que não apresentam sinais de corrosão, apenas pontos com acúmulo de sal. As Figuras 13 (b) e 13 (d) ilustram corpos de prova que apresentam sinais de oxidação, degradação e deslocamento da pintura.

Figura 13 - Critério de reprovação



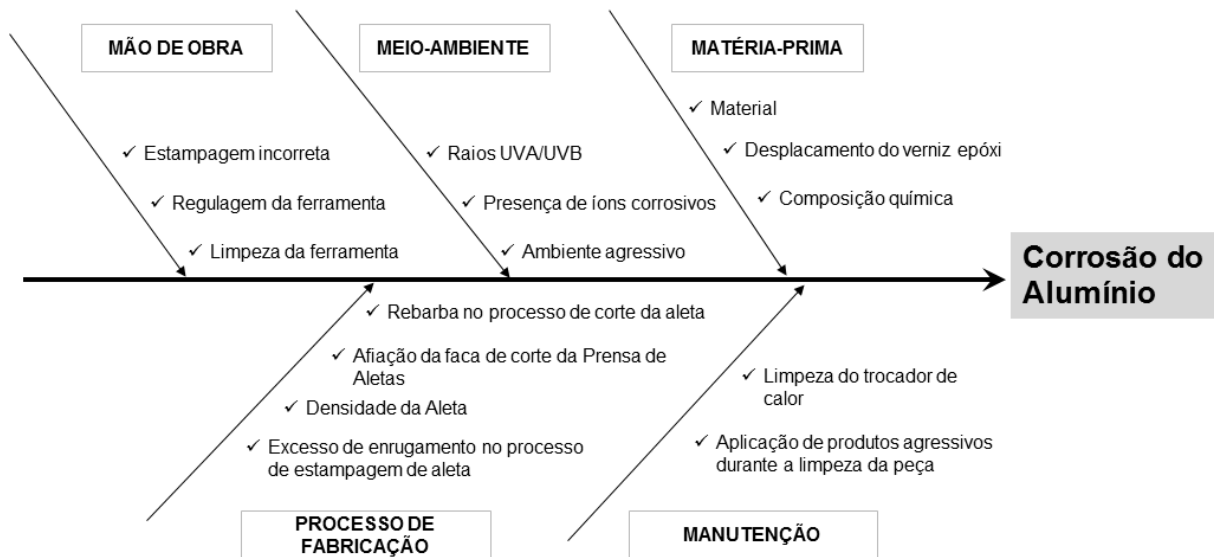
Fonte: Autor

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Fatores que afetam a corrosão

Pesquisas de campo e dados da literatura mostram que a corrosão em trocadores de calor manufaturados com alumínio e cobre é afetada por diversos fatores, conforme ilustrado no diagrama de Ishikawa da Figura 14.

Figura 14 - Diagrama de Ishikawa



Fonte: Autor

No diagrama os fatores foram agrupados em cinco grupos, sendo eles: Mão de Obra, Meio Ambiente, Matéria Prima, Processo de Fabricação e Manutenção. Os grupos Mão de Obra, Meio Ambiente e Manutenção são compostos por fatores incontroláveis. Os grupos Matéria prima e Processo de Fabricação possuem dois fatores que podem ser controlados, a Densidade da Aleta e o Material.

3.4.2 Analise dos dados

Os efeitos dos fatores, bem como a interação entre eles, que afetam a corrosão nos trocadores de calor foram determinados por intermédio de um planejamento fatorial 3^2 completo, ou seja, dois fatores com três níveis cada e com três réplicas.

Os dois fatores identificados foram o material de fabricação das aletas e a densidade de aletas. Os materiais investigados neste experimento foram Alumínio Gold (Material Tipo I), o Alumínio Natural com pintura (Material Tipo II), e o Alumínio Gold com pintura (Material Tipo III). Já a densidade de aletas, refere-se ao número de aletas por polegada.

O Quadro 1, sumariza as características dos fatores.

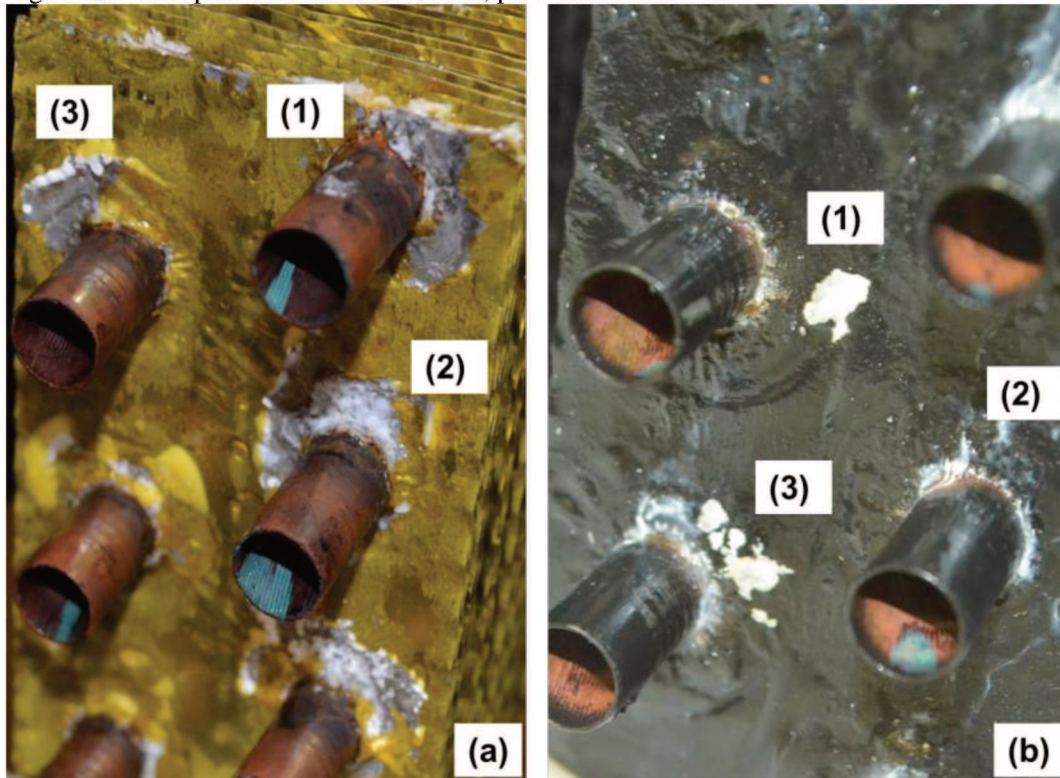
Quadro 1 - Características dos fatores.

Fator	Natureza	Nível		
		-1	0	+1
Material	Qualitativo	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Densidade de Aletas	Quantitativo	5,0	8,5	12,0

A Figura 15 ilustra o resultado de uma inspeção visual em um corpo de prova fabricado com Material Tipo I e outro fabricado com Material Tipo II.

Na Figura 15 (a), (1) ilustra a corrosão galvânica, (2) exemplifica a corrosão por pites e (3) mostra a corrosão filiforme com a deslocação da pintura. Na Figura 15 (b), (1) mostra a corrosão por pites, (2) corrosão do tipo galvânica e (3) apresenta a corrosão filiforme. Quando estes problemas foram constatados a amostra foi considerada reprovada no teste de corrosão, conforme Figura 13.

Figura 15 - Exemplos de corrosão Galvânica, por Pites e Filiforme.



Fonte: Autor

Antes de iniciar a fabricação dos trocadores de calor em escala reduzida, foram descartadas cinquenta aletas durante o ajuste da ferramenta e estabilização do processo. Para realização do experimento com três réplicas, foram fabricadas 27 amostras aleatoriamente conforme demonstrado na Tabela 4.

A Tabela 4 apresenta o planejamento fatorial, com as réplicas ordenadas.

Tabela 4 – Desenho Fatorial com três réplicas

Densidade de Aletas (Fator A)		Tipo do Material (Fator B)		Teste Acelerado de Névoa Salina (hrs)	Densidade de Aletas (Fator A)		Tipo do Material (Fator B)		Teste Acelerado de Névoa Salina (hrs)
5 FPI	-1	Material Tipo III	+1	504	8,5 FPI	0	Material Tipo II	0	360
5 FPI	-1	Material Tipo III	+1	528	8,5 FPI	0	Material Tipo I	-1	216
5 FPI	-1	Material Tipo III	+1	552	8,5 FPI	0	Material Tipo I	-1	216
5 FPI	-1	Material Tipo II	0	240	8,5 FPI	0	Material Tipo I	-1	240
5 FPI	-1	Material Tipo II	0	240	12 FPI	+1	Material Tipo III	+1	624
5 FPI	-1	Material Tipo II	0	264	12 FPI	+1	Material Tipo III	+1	600
5 FPI	-1	Material Tipo I	-1	144	12 FPI	+1	Material Tipo III	+1	648
5 FPI	-1	Material Tipo I	-1	192	12 FPI	+1	Material Tipo II	0	504
5 FPI	-1	Material Tipo I	-1	168	12 FPI	+1	Material Tipo II	0	552
8,5 FPI	0	Material Tipo III	+1	552	12 FPI	+1	Material Tipo II	0	528
8,5 FPI	0	Material Tipo III	+1	576	12 FPI	+1	Material Tipo I	-1	312
8,5 FPI	0	Material Tipo III	+1	576	12 FPI	+1	Material Tipo I	-1	312
8,5 FPI	0	Material Tipo III	0	360	12 FPI	+1	Material Tipo I	-1	336
8,5 FPI	0	Material Tipo III	0	336					

Em todos os testes de hipóteses realizados ao longo deste trabalho, será adotado o nível de significância (α) igual a 0,01, isto é, a hipótese nula será rejeitada sempre que o p-valor for menor do que 0,01.

4 RESULTADOS

Os experimentos revelaram a ocorrência de três tipos de corrosão. A Tabela 5 apresenta o número de horas sem corrosão para as combinações do planejamento. Durante os testes os tipos de corrosões identificadas foram: corrosão galvânica, corrosão por pites e corrosão filiforme. Os dados foram tratados estatisticamente com a utilização do software Minitab 16.

Os dados resultantes deste experimento são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Sumariza os resultados do planejamento

Densidade de Aletas	Tipo do Material					
	Material I (-1)		Material II (0)		Material III (+1)	
5,0 (-1)	144		240		504	
	192	168	240	248	528	528
	168		264		552	
8,5 (0)	216		360		552	
	216	224	336	352	576	568
	240		360		576	
12,0 (+1)	312		504		624	
	312	320	552	528	600	624
	336		528		648	

Na Tabela 5, veem-se três réplicas para o número de horas sem corrosão para cada combinação de tratamento, e ao lado das três réplicas encontra-se o número médio de horas sem apresentar corrosão.

4.1 ANÁLISE DA VARIÂNCIA

A análise de variância (ANOVA) para os dados da Tabela 5 esta sumarizado na Tabela 6.

Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA)

Fonte de Variação	GL	SS	MS	F-Valor	P - Valor
Densidade de aletas (A)	2	142123	71061	195.94	< 0.001
Material (B)	2	513195	256597	707.53	< 0.001
A*B	4	27477	6869	18.94	< 0.001
Erro	18	6528	363		
Total	26	689323			

A ANOVA pode ser utilizada para confirmar a importância dos fatores e seus níveis. A partir da Tabela 5 é possível concluir que a Densidade de Aletas e o Tipo de Material afetam significativamente o número de horas sem corrosão, já que o p-valor associado ao efeito principal de seus fatores é menor que o nível de significância adotado para este planejamento ($\alpha = 0,01$). A interação entre a Densidade de Aletas-Tipo de Material tem um p-valor inferior a 0,001, indicando que a interação entre estes fatores é estatisticamente significativa.

4.2 VERIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA

De acordo com os procedimentos descritos por Montgomery (2013) para a aplicação das curvas características na determinação do tamanho da amostra, o menor valor do parâmetro ϕ^2 , para uma diferença do número médio de horas sem corrosão, entre dois níveis sucessivos da densidade de aletas, de cinquenta horas é de aproximadamente $3,44n$ (n é o número de réplicas).

Este valor para ϕ^2 foi estimado aproximando-se a variância dos dados experimentais pelo valor médio quadrático do erro da Tabela 6.

Portanto, para o nível de significância de 0,01, três réplicas levam a um erro tipo II (β) inferior a 2%, o que mostra que a escolha de três réplicas é adequada para este planejamento.

4.3 VERIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO MODELO

O próximo passo deve ser a verificação da adequação do modelo. De acordo com Montgomery (2013), a decomposição da variabilidade nas observações por meio de uma análise de variância é puramente uma relação algébrica. Contudo, esta técnica requer que certas suposições sejam satisfeitas. Estes pressupostos são que o modelo subjacente utilizado pela ANOVA descreva adequadamente as observações e que os erros sejam normalmente e independentemente distribuídos com média zero e variância desconhecida, mas constante.

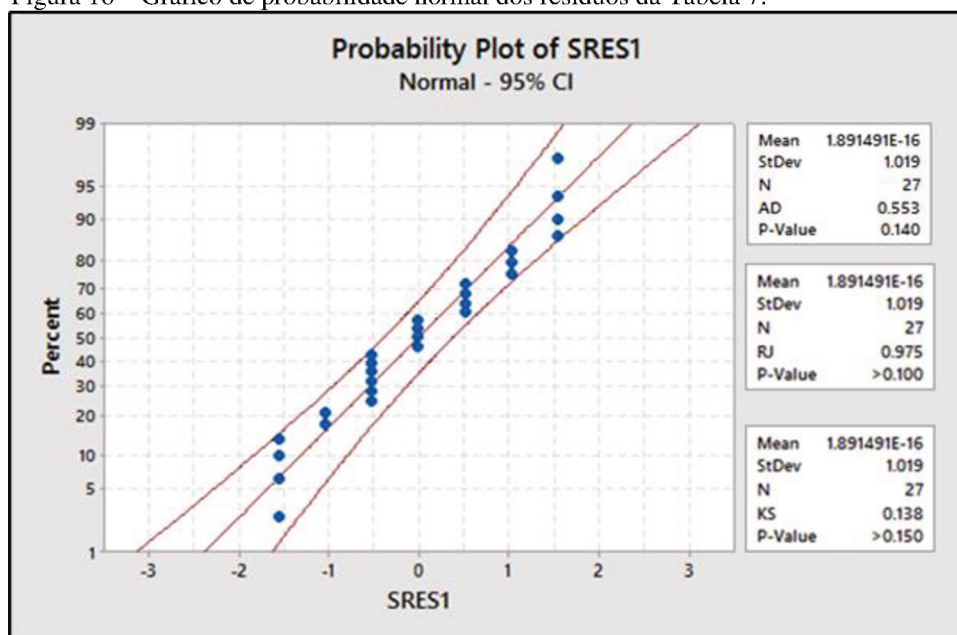
A violação de tais suposições pode ser facilmente investigada pelo exame visual dos resíduos de acordo com Montgomery (2013). Os resíduos podem ser definidos como a diferença entre os valores reais e previstos para a variável de resposta. A Tabela 7 apresenta os resíduos padronizados para o número de horas sem corrosão da Tabela 5.

Tabela 7 – Resíduos do Experimento

Densidade de Aletas		Material Tipo I	Material Tipo II	Material Tipo III
		-1	0	+1
5,0	-1	-1.095	-0.548	-1.643
		-0.548	0.548	-1.095
		-0.548	-1.643	0.000
8,5	0	0.548	-0.548	0.000
		-0.548	-1.095	0.0548
		-0.548	1.643	-1.643
12,0	+1	0.548	1.095	1.643
		1.095	0.548	0.548
		1.095	0.000	1.643

A verificação do pressuposto de normalidade pode ser feita através da construção de gráfico de probabilidade normal dos resíduos, como mostrado na Figura 16. Se a distribuição do erro subjacente for normal, este gráfico deve se assemelhar a uma reta.

Figura 16 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos da Tabela 7.

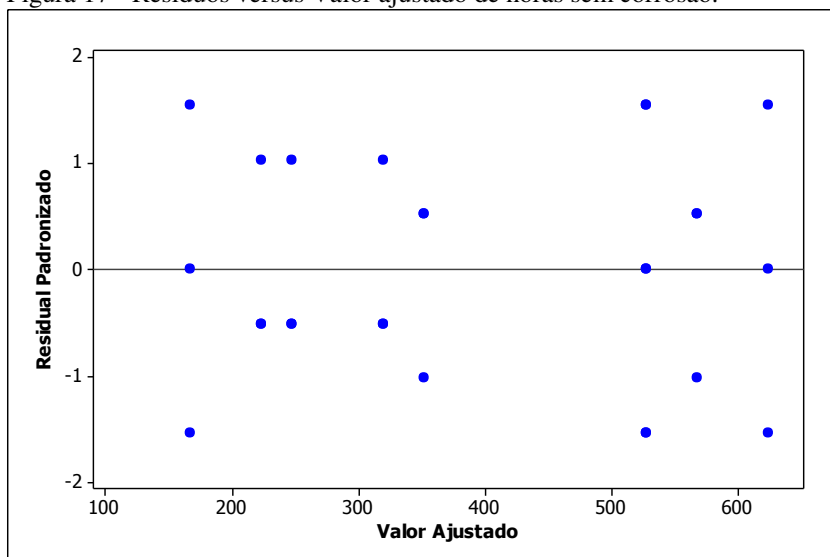


Fonte: Autor

Na Figura 16, pode-se verificar que todos os pontos estão dentro da banda de confiança, portanto a suposição de que os resíduos são normais é razoável. A estatística de Anderson-Darling (0,553 - p-valor = 0,140) e estatística de Ryan-Joiner (0,975 - p-valor > 0,100) e Kolmogorov-Smirnov (0,138 - p-valor > 0,150) confirmam esta conclusão.

De acordo com Montgomery (2013), se o modelo for adequado e todas as considerações estiverem satisfeitas, os resíduos não devem apresentar nenhum padrão. Não deve haver nenhuma relação entre os resíduos e qualquer um dos fatores e tão pouco com a variável de resposta.

Figura 17 - Resíduos versus Valor ajustado de horas sem corrosão.



Fonte: Autor

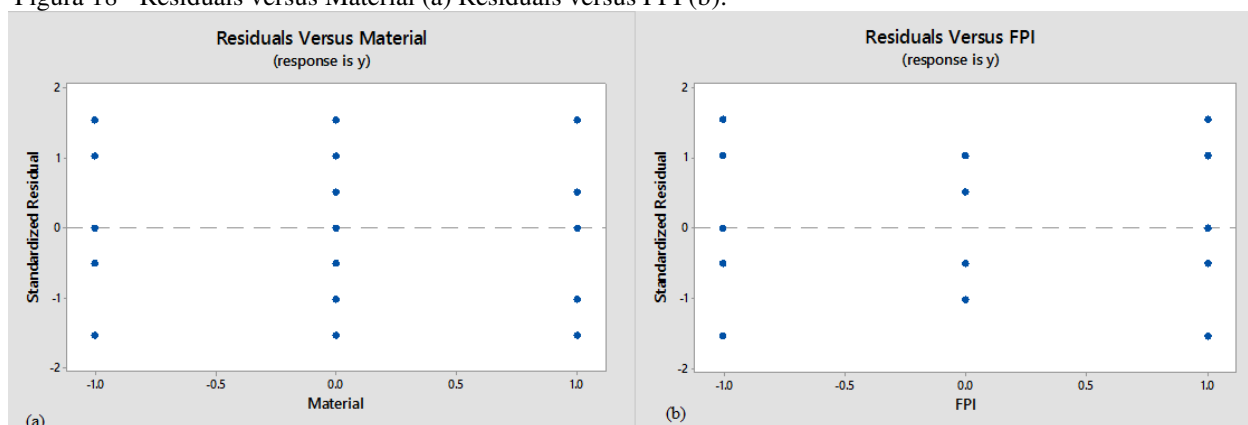
Um exame visual da Figura 17 indica que a variância parece ser constante para toda a faixa da variável de resposta.

A partir da Figura 17, pode ser visto que os resíduos são sem estrutura, que não estão relacionados com as respostas previstas. Nenhuma estrutura incomum é aparente. Em seguida, a suposição de homogeneidade de variâncias não tenha sido violada.

Portanto, parece que a análise gráfica dos resíduos não mostrou a violação de nenhum dos pressupostos, logo as conclusões baseadas na análise de variância sumarizada na Tabela 6 permanecem válidas.

A Figura 18 (a) e (b) ilustram os resíduos, versus o tipo de material e os Resíduos versus a densidade de aletas, respectivamente.

Figura 18 - Residuais versus Material (a) Residuais versus FPI (b).



Fonte: Autor

Observa-se que a variância é aproximadamente constante para todos os três materiais. Parece que a variância é ligeiramente menor para os valores intermediários da densidade de aletas. É possível que as combinações dos fatores envolvendo o nível intermediário para a densidade de aletas leve a um número de horas sem corrosão mais errático do que os demais níveis. Contudo, de acordo com Montgomery (2013) não é grave o bastante para ter um efeito dramático nas análises e conclusões.

Uma vez que nenhum dos pressupostos foi violado, as conclusões baseadas em análise de variância (Tabela 6) permanecem válidas.

4.4 COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS

Uma vez que a ANOVA indicou que as médias dos tratamentos apresentados na Tabela 5 diferem entre si, quer comparada por linha quer por coluna, é usual efetuar comparações entre essas médias para identificar quais diferenças são estaticamente significativas.

Essas comparações também são importantes quando há iterações estatisticamente significantes entre os fatores, pois esta pode obscurecer os efeitos principais dos fatores.

Uma abordagem para se avaliar essas diferenças é fixar um dos fatores em um nível específico e testar a diferença entre as médias dos outros fatores e o nível de referência.

Tabela 8 – Diferenças entre as combinações de todos os fatores.

Densidade de Aletas	Tipo de Material		
	Material Tipo I	Material Tipo II	Material Tipo III
5,0 → 8,5	56	104	40
5,0 → 12,0	152	280	96
8,5 → 12,0	96	176	56
Material	FPI		
	5.0	8.5	12.0
Material Tipo I → Material Tipo II	80	128	208
Material Tipo I → Material Tipo III	360	344	304
Material Tipo II → Material Tipo III	280	216	96

Existem vários métodos para se efetuar comparações múltiplas de médias.

O teste de Tukey foi escolhido para levar adiante essa análise por ser o método mais popular. O teste de Tukey declara que as médias de tratamentos são significativamente diferentes quando a diferença entre elas for maior que valor T_α .

$$T_\alpha = q_x(\alpha, f) \sqrt{\frac{mse}{n}} \quad (1)$$

Onde,

α = Nível de significância adotado pelo teste.

α = Número de tratamentos que se deseja comparar.

f = Número de graus de liberdade associados com o MSE.

mse = Erro médio quadrático retirado da Tabela que sumariza o ANOVA.

n = Número de réplicas (tamanho da amostra).

q_x = Fator tabelado.

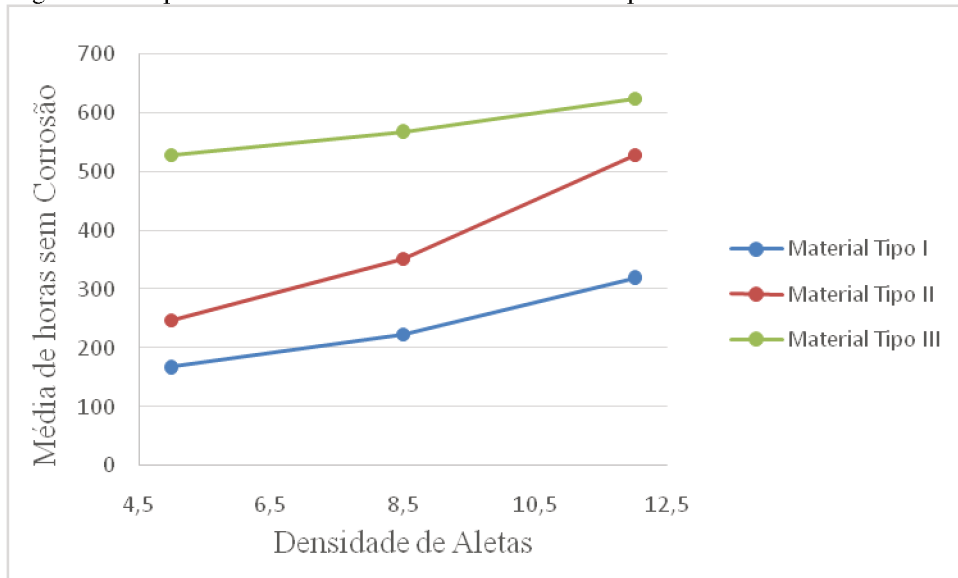
Da Tabela 5, tem-se que $\alpha = 3$ e $n = 3$. Da Tabela 6 $mse = 363$ e $f = 18$. Portanto, o teste Turkey declara que as médias de dois tratamentos são significativamente diferentes se a diferença entre elas for maior do que 52 horas.

Esta análise indica que o número médio de horas sem corrosão é diferente para todas as combinações de tratamento na Tabela 5, exceto para o Material Tipo III, para as densidades de aletas 5,0 e 8,5 FPI.

4.5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Para auxiliar na interpretação dos resultados deste experimento, a Figura 19 mostra as respostas médias para cada combinação de tratamento.

Figura 19 – Tipo do Material versus Densidade de Aletas para Tabela 5



Fonte: Autor

A Figura 19 sugere que o número de horas sem corrosão varie linearmente com a densidade de aletas. Para confirmar a ausência de uma curvatura quadrática na função resposta aplica-se um teste de hipóteses para verificar a nulidade do regressor de segunda ordem.

$$\begin{cases} H_0: B_2 = 0 \\ H_1: B_2 \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

A função resposta para os três tipos de material não apresenta uma curvatura quadrática já que a hipótese nula não pode ser rejeitada a um nível de significância de 0,01 (Material I, p-valor=0,165; Material II, p-valor=0,03; Material III, p-valor=0,6122).

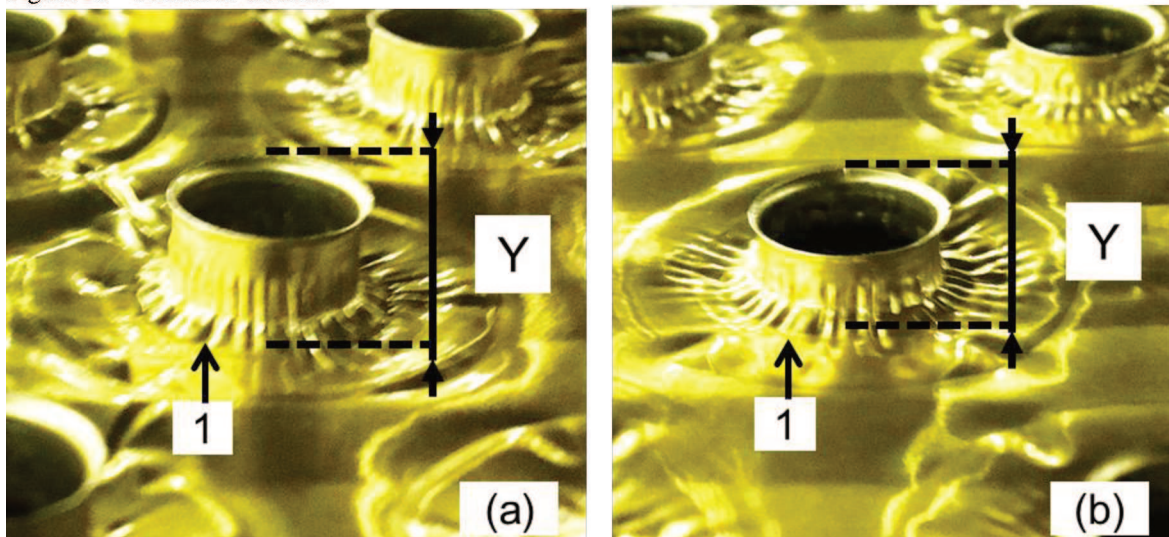
A curva para Material Tipo II é a próxima de uma função de segunda ordem. Não há razões para acreditar que o comportamento da corrosão seja diferente neste tipo de material.

Outro ponto importante a se observar na figura 19 é que as retas não são paralelas, o que sugere a interação entre os fatores. Embora esta interação seja pequena, é estatisticamente significativa, como pode ser visto na Tabela 6.

Assim o número de horas sem corrosão pode ser considerado variando linear sobre toda a faixa de densidade de aletas, e quanto maior a densidade de aletas, maior será o número de horas sem corrosão independentemente do tipo de material. Pode-se dizer que isso ocorre em função da tração que o material sofre no processo de conformação da aleta.

Podemos dizer que a densidade de aletas é o resultado da altura do colarinho da aleta. Como pode ser visto na Figura 20 (a) e (b) para se atingir uma densidade de aletas com 5,0 FPI, o alongamento proveniente do processo de estampagem é consideravelmente maior do que em uma densidade de aletas como 8,5 FPI. A Figura 20 (a) representa o colarinho da aleta quando temos uma densidade de aletas de 5,0 FPI, neste caso a cota Y é igual a 5,08 mm. Quando temos 8,5 FPI a cota Y é igual a 2,98 mm, como pode ser visto na Figura 20 (b). Como consequência o alumínio tem sua estrutura e dureza alterada pelo processo, o que modifica o comportamento do material quando exposto em ambientes agressivos, demonstrado no ponto (1) da Figura 20. Ainda quando utilizado o Material Tipo I, esse esforço gerado pelo alongamento danifica o revestimento do alumínio, gerando falhas que permitem o início do processo de corrosão nestas regiões.

Figura 20 - Colarinho da aleta



Fonte: Autor

O número máximo de horas sem corrosão é alcançado com o Material III, o que se explica pelo fato deste material passar por dois processos de revestimento, o primeiro intrínseco à fabricação das bobinas de alumínio, onde é aplicada uma camada de verniz epóxi de 0,02 mm de espessura. Porém no processo de conformação das aletas, o material perde esta proteção nas arestas de cortes. Portanto quando se aplica a pintura eletrostática no processo posterior à conformação das aletas, obtém-se uma segunda camada protetiva, gerando uma combinação de dois revestimentos que contribuem significativamente para o maior número de horas sem apresentar corrosão.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar diferentes medidas de proteção à corrosão do alumínio AA8006 em trocadores de calor, por intermédio de ensaios acelerados de névoa salina em corpos de prova, em escala reduzida do produto. Para tal fim utilizou-se a aplicação do planejamento de experimentos, com base nos métodos estatísticos propostos por Montgomery, para estudar a influência dos materiais e da densidade de aletas (número de aletas por polegadas) no número de horas sem corrosão.

Conclui-se que a melhor configuração de fatores foi atingida nos níveis mais altos, com o material tipo III e uma densidade de aletas de 12,0 FPI. Nesta configuração se alcançou-se o resultado de 624 horas sem corrosão, o que é consideravelmente superior ao menor resultado alcançado. Da mesma forma podemos dizer que os piores resultados foram alcançados nos níveis mais baixos, com material tipo I e densidade de aletas de 5,0 FPI alcançando-se atingiu 168 horas sem corrosão.

Por meio da análise da variância podemos comprovar a importância dos fatores e seus níveis. Com a análise dos dados é possível afirmar que a densidade das aletas e o tipo de material afetam significativamente o número de horas sem corrosão, estes fatores apresentam relevância, dentro de um nível de significância de 99%. Podemos também verificar que existe interação entre densidade de aletas-tipo de material onde o p-valor é inferior a 0,001, podendo afirmar que existe uma forte interação entre os fatores estudados e a variável de resposta.

A aplicação do método de planejamento de experimentos se mostrou eficiente para o presente estudo. Foi possível determinar a melhor configuração de tipo de material e densidade de aletas para trocadores de calor, reduzindo assim a possibilidade de falhas por corrosão.

Desta forma podemos dizer que o objetivo proposto deste trabalho foi cumprido.

6 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação analisou medidas de proteção à corrosão do alumínio AA8006 para trocadores de calor.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise de diferentes ligas de alumínio para avaliar o impacto da composição química no número de horas sem apresentar corrosão.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHI, H.; ERSHAD-LANGROUDI, A.; SALIMI, A.; RAHIMI, A. **Anticorrosive Coatings Prepared Using Epoxy–Silica Hybrid Nanocomposite**. *Materials Industrial & Engineering Chemistry Research*, p. 10858-10869, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8094**: material metálico revestido e não revestido – Corrosão por exposição à névoa salina. Rio de Janeiro.1983.

AIGBODION, V. S.; POPOOLA, A. P. I. & FATOBA, O. S. **Evaluation of hardness values and corrosion behavior of laser alloyed 20Al-20Sn-60Ti on UNS G10150 mild steel**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1-11, 2015.

ALUMINUM ASSOCIATION. Disponível em: <<http://www.aluminum.org/>>. Acesso em 09 de setembro. 2015.

ARJMAND, F.; WANG, J.; ZHANG, L. **Investigation of the Corrosion Inhibition of CTAB and SDS on Carbon Steel Using an Experimental Design Strategy**. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 809-819, 2016.

ARTHUR, D. E.; JONATHAN, A.; AMEH P. O.; ANYA C. **A review on the assessment of polymeric materials used as corrosion inhibitor of metals and alloys**. *International Journal of Industrial Chemistry*. DOI 10.1186/2228-5547-4-2, 2013.

ASGHARI, E.; ASHASSI-SORKHABI, H.; AHANGARI, M.; BAGHERI, R. **Optimization of a Three-Component Green Corrosion Inhibitor Mixture for Using in Cooling Water by Experimental Design**. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25: 1416. DOI:10.1007/S11665-015-1865-7, 2016.

BAJAT, J. B.; MILOŠEV, I.; JOVANOVIĆ, R. M.; JANČIĆ-HEINEMANN, M.; DIMITRIJEVIĆ; MIŠKOVIĆ-STANKOVIĆ, V.B.. **Corrosion protection of aluminium pretreated by vinyltriethoxysilane in sodium chloride solution**. *Corrosion Science*, Volume 52, Issue 3, March 2010, Pages 1060-1069, ISSN 0010-938X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2009.11.035>,

BALASUBRAMANIAN, M.; JAYABALAN, V.; BALASUBRAMANIAN, V. **Optimizing pulsed current parameters to minimize corrosion rate in gas tungsten arc welded titanium alloy**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 39, 474-481.

BANCZEK, E. P.; MORAES, S. R.; ASSIS, S. L.; COSTA, I.; MOTHEO, A. J. **Effect of surface treatments based on self-assembling molecules and cerium coatings on the AA3003 alloy corrosion resistance**. *Materials and Corrosion*, 64: 199–206. doi: 10.1002/maco.201106205, 2013.

BINGÖL, DENİZ; ZOR, SIBEL. **Optimization of the Experimental Variables Influencing the Corrosion Rate of Aluminum Using Response Surface Methodology**, CORROSION, doi = 10.5006/0382, <http://dx.doi.org/10.5006/0382>, <http://dx.doi.org/10.5006/0382>, 2012.

BRANDT, J. L. **Properties of pure aluminum**. In: HATCH, J.E. (Ed.). Aluminum: properties and physical metallurgy. Metals Park, Ohio: ASM, 1990. ch.1, p. 1-24.

CALABRESE, L.; GALTIERI, G.; BORSELLINO, C.; DI BELLA, G. & PROVERBIO, E. **Durability of hybrid clinch-bonded steel/aluminum joints in salt spray environment**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 1-11.

CARRINO, L.; NAPOLITANO, G.; SORRENTINO, L. **Wettability improving of 2024 aluminium alloy by oxygen cold plasma treatment**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 31, 465-473.

COST OF CORROSION. Disponível em: <<http://www.corrosioncost.com/home.html>>. Acesso em 01 de setembro. 2015.

COSTA, R. C; DACOREGGIO, M.V.; KEJELIN, N.Z.; COMELI, F.W. **Avaliação da Resistência a Corrosão de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica a Arco: uma Aplicação em Trocadores de Calor**. Soldagem e Inspeção São Paulo, Vol. 19, Nº. 04, p.292-301, Out/Dez 2014

DAVIS, J. R. (Ed.). **Properties of aluminum and aluminum alloys**. In:_. ASM specialty handbook: Aluminum and aluminum alloys. Metals Park, Ohio: ASM International, 2002, p. 577-731.

DZHURINSKIY, D., MAEV, R. GR., LESHCHYNSKY, V.; STRUMBAN, E. **Corrosion Protection of Light Alloys using Low Pressure Cold Spray, in ICAA13**. 13th International Conference on Aluminum Alloys (eds H. Weiland, A. D. Rollett and W. A. Cassada), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118495292.ch57, 2012.

ELANGO VAN, K.; BALASUBRAMANIAN, V.; BABU, S. **Developing an Empirical Relationship to Predict Tensile Strength of Friction Stir Welded AA2219 Aluminum Alloy**. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17, 820-830.

FICHA TÉCNICA LIGA DE COBRE UNS-C12200. Disponível em: <<http://www.termomecanica.com.br/website/files/materiais-tecnicos/Tubos%20de%20Cobre%20Ranhurados.pdf>>. Acesso em 14 de abril. 2016.

FRAU, A. F., PERNITES, R. B., ADVINCULA, R. C. **A conjugated polymer network approach to anticorrosion coatings: Poly(vinylcarbazole) electrodeposition**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010 49 (20), 9789-9797, DOI: 10.1021/ie100813t.

JIANG, Mei-Yan; WU, Lian-Kui; HU, Ji-Ming; ZHANG, Jian-Qing. **Silane-incorporated epoxy coatings on aluminum alloy (AA2024). Part 1: Improved corrosion performance**. Corrosion Science, Volume 92, March 2015, Pages 118-126, ISSN 0010-938X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2014.11.046>.

JIJU, Antony. **Improving the manufacturing process quality using design of experiments: A case study**. International Journal of Operations & Production Management, 21(5/6), 812-822. DOI: 01443570110390499, 2001.

LIMITES DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO. Disponível em: <<http://www.vmetais.com.br/pt-BR/Negocios/Aluminio/Documents/Cat%C3%A1logo%20Laminados.pdf>>. Acesso em 07 de setembro. 2015.

LIRA, Letícia Pereira. **Avaliação da resistência ao desgaste e à corrosão de revestimentos aspergidos termicamente em liga de alumínio AA 7475**. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012. Dissertação de Mestrado em Materiais. [acesso 2015-09-11]. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18150/tde-29082013-102825/>>.

LIU, H. C.; XU, H. P.; ZHU, L. Q.; LIU, J. Z.; YE, X. B.; HU, B. R. **Corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy in neutral salt spray environment with different Al-clad removing processes**. Materials and Corrosion, 64: 207–211. doi: 10.1002/maco.201106121, 2013.

LIU, Yanjie; WANG, Zhenyao; KE, Wei. **Study on influence of native oxide and corrosion products on atmospheric corrosion of pure Al**. Corrosion Science, Volume 80, March 2014, Pages 169-176, ISSN 0010-938X, DOI i.org/10.1016/j.corsci.2013.11.027.

LOURENÇO, J. C.; FARIA, M. I. S. T.; ROBIN, A.; PRISCO, L. P.; PUCCINI, M.C. **Influence of process parameters on localized corrosion of AA7075 alloy during the production of aeronautic components**. Materials and Corrosion, 66: 1498–1503. doi: 10.1002/maco.201508402, 2015.

LYMAN, T. (ED.). **Pure metals**. In:_. Metals handbook: properties and selection of metals. 8th ed. Metals Park, Ohio: ASM, 1961. Vol.1., p. 1197-1231.

MAHMOUD, T. S.; EL-KADY, E.Y.; AL-SHIHRI, A. **Mechanical and corrosion behaviours of Al/SiC and Al/Al₂O₃ metal matrix nanocomposites fabricated using powder metallurgy route**. Corrosion Engineering, Science and Technology, 47:1, 45-53, DOI: 10.1179/1743278211Y.0000000014, 2012.

MCCAFFERTY, E. **Thermodynamics of corrosion: pourbaix diagrams**. In **Introduction to corrosion science**. Springer, New York, pp 95–117. doi:10.1007/978-1-4419-0455-3_6, 2010.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. New York , USA: John Wiley, 2013.

NACE INTERNATIONAL - NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. Disponível em: <<https://www.nace.org/uploadedFiles/Publications/ccsupp.pdf>>. Acesso em 25 de julho. 2016.

OLAKANMI, E. O. **Optimization of the Quality Characteristics of Laser-Assisted Cold-Sprayed (LACS) Aluminum Coatings with Taguchi Design of Experiments (DOE)**. *Materials And Manufacturing Processes* Vol. 31 , Iss. 11,2016 Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2014.984306>>

PEREIRA, M. C. **Estudo Morfológico e Cinético da Corrosão por Pites em liga de alumínio 1050**. Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista Campus de Guaratinguetá, 2010. Dissertação de Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais. [acesso 2017-02-01]. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp150680.pdf>>.

PICON, Carlos Alberto; FERNADES, Frederico Augusto Pires; TREMILIOSI-FILHO, Germano; RODRIGUES, Cesar Augusto D; CASTELETTI, Luiz Carlos. **Estudo do mecanismo de corrosão por pites em água do mar de aços inoxidáveis supermartensíticos microligados com Nb e Ti**. *Rev. Esc. Minas, Ouro Preto* , v. 63, n. 1, p. 65-69, mar. 2010 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672010000100011&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 13 mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672010000100011>.

RAHIMI; Hamed; MOZAFFARINIA, Reza; NAJAFABADI; Akbar Hojjati; RAZAVI, Reza Shoja; PAIMOZD, Ebrahim, **Optimization of process factors for the synthesis of advanced chrome-free nanocomposite sol-gel coatings for corrosion protection of marine aluminum alloy AA5083 by design of experiment**, *Progress in Organic Coatings*, Volume 76, Issues 2–3, February–March 2013, Pages 307-317, ISSN 0300-9440, <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2012.09.025>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944012002597>)

RAMBABU, G.; BALAJI NAIK, D.; VENKATA RAO, C.H.; SRINIVASA RAO, K.; MADHUSUDAN REDDY, G. **Optimization of friction stir welding parameters for improved corrosion resistance of AA2219 aluminum alloy joints**. *Defence Technology*, Volume 11, Issue 4, December 2015, Pages 330-337, ISSN 2214-9147, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2015.05.003>.

RASTKERDAR, E.; SHAMANIAN, M.; SAATCHI, A. **Taguchi Optimization of Pulsed Current GTA Welding Parameters for Improved Corrosion Resistance of 5083 Aluminum Welds**. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22, 1149-1160.

REBOUL, M. C.; BAROUX, B. **Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys**. *Materials and Corrosion*, 62: 215–233. doi: 10.1002/maco.201005650, 2011.

ROY, R. K. **A primer on the Taguchi Method**, 2nd Edition. New York: Van Nostrand Reinhold, 2010.

SILVA, Daiane Piva Barbosa da. **Desenvolvimento de estruturas do tipo bi-camada baseadas em camadas auto-organizadas e polianilina para a proteção contra a corrosão de ligas de alumínio [online]**. São Carlos : Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010. Dissertação de Mestrado em Físico-Química. [acesso 2015-09-13]. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75131/tde-13082010-152925/>>.

SINGH, S.; YEH, M. F. **Optimization of Abrasive Powder Mixed EDM of Aluminum Matrix Composites with Multiple Responses Using Gray Relational Analysis.** Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21, 481-491.

SURTEC. Disponível em: < http://www.surtec.com.br/at/surtec_testes_corrosao >. Acesso em 13 de abril de, 2016.

SZURKALO, Margarida. **Investigação do efeito de moléculas auto-organizáveis na resistência à corrosão da liga de Alumínio 1050 [online].** São Paulo : Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2009. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais. [acesso 2015-09-13]. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-23092011-162659/>>.

VERA, Rosa; VERDUGO, Patricia; ORELLANA, Marco; MUÑOZ, Eduardo. **Corrosion of aluminium in copper–aluminium couples under a marine environment: Influence of polyaniline deposited onto copper.** Corrosion Science, Volume 52, Issue 11, November 2010, Pages 3803-3810, ISSN 0010-938X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2010.07.033>.

VIOMAR, Aline; GALLINA, André Lazarin; COSTA, Isolda; CUNHA, Maico Taras da; RODRIGUES, Paulo Rogério Pinto; BANCKZEK, Everson do Prado. **Aplicação de SAM em liga de alumínio AA 2024-T3 com desengraxe alcalino.** Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto , v. 65, n. 1, p. 93-98, Mar. 2012 .

WANG B; Z.Y. WANG; W. HAN; W. KE. **Atmospheric corrosion of aluminium alloy 2024-T3 exposed to salt lake environment in Western China.** Corrosion Science, Volume 59, June 2012, Pages 63-70, ISSN 0010-938X, <<http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.02.015>>.

WANG Z.H.; YUAN J.T.; LIU T.T.; HUANG J.; QIAO L. **Study on surface roughness in high-speed milling of AlMn1Cu using factorial design and partial least square regression.** Int J Adv Manuf Technol 76(9–12):1783–1792, 2015.

WANG, B.; LIU, J.; YIN, M.; XIAO, Y.; WANG, X.; H. AND HE; J. X. **Comparison of corrosion behavior of Al-Mn and Al-Mg alloys in chloride aqueous solution.** First published: 13 March 2015, Full publication history; Materials and Corrosion, 67: 51–59. doi: 10.1002/maco.201408211

YAN, Maocheng; VETTER, Christopher A.; GELLING, Victoria J.. **Corrosion inhibition performance of polypyrrole Al flake composite coatings for Al alloys.** Corrosion Science, Volume 70, May 2013, Pages 37-45, ISSN 0010-938X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.12.019>.

YOUNIS, A. A.; ENSINGER, W.; EL-SABBAH, M. M. B.; AND HOLZE, R. **Corrosion protection of pure aluminium and aluminium alloy (AA7075) in salt solution with silane-based sol–gel coatings.** Materials and Corrosion, 64: 276–283. doi: 10.1002/maco.201206691, 2013. Disponível em< <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/maco.201206691/abstract>>

ZHANG, B.; PATLOLLA, V. R.; CHIAO, D.; KALLA, D. K.; MISAK, H.; ASMATULU, R. **Galvanic corrosion of Al/Cu meshes with carbon fibers and graphene and ITO-based**

nanocomposite coatings as alternative approaches for lightning strikes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67, 1317-1323.