



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – UNIPAMPA
CENTRO DE TECNOLOGIA DE ALEGRETE – CTA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

VITOR GODOY ARRUSSUL

**COMPORTAMENTO CORROSIVO DE SOLDAS À FRICÇÃO FSW
DO TIPO ALUMÍNIO-COBRE**

**Alegrete
2015
VITOR GODOY ARRUSSUL**

**COMPORTAMENTO CORROSIVO DE SOLDAS À FRICÇÃO FSW
DO TIPO ALUMÍNIO-COBRE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Aldoni G. Wiedenhof.

Coorientador: Prof^a. Dr^a. Silvia M. Tamborim;

**Alegrete
2015
VITOR GODOY ARRUSSUL**

COMPORTAMENTO CORROSIVO DE SOLDAS À FRICÇÃO FSW DO TIPO ALUMÍNIO-COBRE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:

Banca examinadora:

Prof. (Msc.) Aldoni G. Wiedenhof.
Orientador
UNIPAMPA

Prof. (Dr.) Silvia Tamborim
UNIPAMPA

Prof. (Msc.) Alexandre Hoffman
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha mãe, Sônia Maria Godoy Arrussul, ao meu pai, Gilberto Ferreira Arrussul e ao meu irmão Luciano Godoy Arrussul (In memoriam), por todo amor, dedicação, carinho, incentivo e apoio que sempre me deram por toda caminhada nesta vida. Meu sentimento mais bonito é por vocês.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado a chance de nascer e, a força necessária para suportar e aprender com os vários obstáculos que encontramos na escola da vida.

Aos meus pais, Gilberto e Sônia, pelo amor, incentivo, e apoio incondicional sempre. Ao meu irmão Alexandre, por suas palavras de carinho e seus sorrisos de descontração, os quais foram de suma importância para que eu não tivesse desistido do curso, quando tudo caminhava para este fim.

A esta universidade, seu corpo docente, administração e sua direção, que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte melhor, contaminado pela confiança no mérito e ética aqui presentes.

A minha orientadora Dr^a. Silvia M.Tamborim, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e principalmente pelos incentivos.

Ao meu orientador Msc. Aldoni G. Wiedenhof, pelas palavras de incentivo, pelo suporte e pela amizade.

Agradeço a todos os professores, desde o jardim de infância até o presente momento, por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade do educar no processo de formação profissional, pelo tanto de sua dedicação por mim, não somente pelos ensinamentos que me passaram, mas por terem me feito aprender.

Aos meus colegas e amigos, Eduardo Porto e Fabrício Goulart, pela ajuda prestada em toda graduação, tanto dentro, quanto fora da universidade, sem vocês a caminhada não seria possível.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação, como graduando e ser humano, meu muito obrigado.

Por fim, agradeço em especial meu irmão Luciano (in memoriam) que desde o meu nascimento contribuiu diretamente para formação do meu caráter. Contigo meu irmão aprendi a ler, a escrever, a ter amor pelo estudo desde muito novo. Aprendi que devemos sempre nos esforçar ao máximo, lutar pelos nossos sonhos, e que não existe sonho impossível de se concretizar, devemos sempre encarar a vida com um sorriso na alma, respeitando sempre a todos. Meu irmão, esta vitória é pra você.

“Você, eu, ninguém vai bater tão forte quanto a vida, mas não se trata de bater forte. Se trata de quanto você consegue apanhar e seguir em frente, o quanto você é capaz de aguentar e continuar tentando. É assim que se consegue vencer”.

Rocky Balboa

RESUMO

3-Glicidoxipropil-trimetoxi-silano foi utilizado como um método preventivo no controle da corrosão em ligas de alumínio AA6060-T5 e em ligas de cobre Cu ASTM-B110, bem como suas juntas soldadas por fricção (do inglês friction stir welding - FSW). As amostras de AA 6060-T5/Cu ASTM-B110 soldadas à fricção foram cortadas utilizando-se uma máquina de precisão ISOMET 2000 e atacadas com duas soluções diferentes: uma contendo $\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$ (0.45:0.45:0.1 v/v) na superfície da junta de Cu ASTM-B-110 e a outra contendo 0.5% (v/v) HF na superfície da junta de AA 6060-T5. Uma eficiente região de mistura entre AA 6060-T5 e Cu ASTM-B110 foi observada na zona de mistura (do inglês weld nugget zone – WNZ) conforme observações por microscopia ótica. O efeito do 3-Glicidoxipropil-trimetoxi-silano depositado sobre a superfície destes materiais e seguida da imersão destes em solução de NaCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ NaCl foi investigado por testes eletroquímicos. Os resultados, principalmente o comportamento indutivo nas baixas frequências, indicam que o revestimento da superfície das ligas de AA6060-T5, das ligas de Cu ASTM-B110 e da junta soldada AA6060-T5/Cu ASTM-B110 com 3-Glicidoxipropil-trimetoxi-silano leva a uma diminuição na velocidade de corrosão comparada as amostras não revestidas. Este fato caracteriza que este tratamento pode ser uma eficiente alternativa para retardar processos corrosivos, particularmente a forte corrosão galvânica que comumente ocorre em juntas soldadas a fricção do tipo AA6060-T5/CuASTM-B110.

Palavras-chaves: Alumínio; Cobre; FSW, corrosão, 3-Glicidoxipropil trimetoxi silano.

ABSTRACT

3-Glycidoxypropyl-trimethoxy-silane was used as a preventive measure for corrosion control in 6060-T5 aluminum alloy (AA 6060-T5) and ASTM-B110 copper (Cu ASTM-B110) joined by friction stir welding (FSW). The substrates of the AA 6060-T5/Cu ASTM-B110 stir welding joint were cut using a precision cutting machine (ISOMET 2000) and etched with two different solutions: H₂O: NH₄OH:H₂O₂ (0.45: 0.45: 0.1 v/v) at the Cu ASTM-B-110 joint surface and 0.5% (v/v) HF at the AA 6060-T5 joint. A good mixing of AA 6060-T5 and Cu ASTM-B110 was observed in the weld nugget zone (WNZ) according to observations by optical microscopy. The effect of the 3-glycidoxypropyl-trimethoxy-silane deposited on the surfaces of these materials following immersion in 0.05 mol L⁻¹ NaCl was investigated by electrochemical methods. The results, mainly the inductive behavior at low frequencies, show that the coating of the alloys AA 6060-T5 and Cu ASTM-B110, and the welding joint (AA 6060-T5/Cu ASTM-B110) with 3-glycidoxypropyl-trimethoxy-silane leads to a decrease in the corrosion rate on exposure to a chloride solution in comparison with non-coated materials. This feature characterizes this treatment as an alternative approach to retarding corrosion processes, particularly the strong galvanic corrosion that commonly occurs at the AA 6060-T5/Cu ASTM-B110 welding joint.

Keywords: Aluminum; Copper; FSW, corrosion, Glixidoxipopil 3- trimethoxy silane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sequência de soldagem à fricção convencional.....	30
Figura 2 – Princípio do processo FSW.....	31
Figura 3 – Diagrama de Pourbaix do Cobre.....	35
Figura 4 – Diagrama de Poubaix do Alumínio.....	37
Figura 5 – Pilha de Concentração.....	39
Figura 6 - Dimensões das juntas soldadas.....	45
Figura 7: Amostras de liga de alumínio AA ASTM 6060-T5 (a), de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO (b) e da junta soldada FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre B-187 C110-Têmpera ½ DURO (c) utilizadas.....	47
Figura 8 – Arranjo Experimental Típico para a Realização das Medidas de Impedância AC em Sistemas Eletroquímicos.....	49
Figura 9 – circuito elétrico equivalente de uma interface metal eletrólito.....	50
Figura 10 – Arranjo esquemático para levantamento de curvas de polarização. ET = eletrodo de trabalho; ER = eletrodo de referência; CE = contra-eletrodo.....	52
Figura 11 – curva de polarização (b) obtida num potenciostato para um caso de corrosão simples (a).....	53
Figura 12 – Representação esquemática do método potencioestático para levantamento de uma curva de polarização experimental anódica a partir do potencial de corrosão E^*	54
Figura 13 – Representação Esquemática do Método Esquemático Potencial dinâmico para Levantamento de Uma Curva de Polarização Experimental Anódica a partir do Potencial de Corrosão E^*	55
Figura 14 – Ilustração esquemática de um Metal Me cujas Reações (Catódica e Anódica) são controladas pela polarização de ativação de Tafel. E^* = Potencial de corrosão; i^* = densidade de corrente de corrosão; E_{me} = Potencial do Equilíbrio do Eletrodo Me/Me ⁺⁺ ; E_H = Potencial do Equilíbrio do Eletrodo H ⁺ /H ₂	56
Figura 15 – Representação da Equação de Wagner-Traud num gráfico de E vs. Log Δ il.....	58
Figura 16: Espectros emitidos pelo volume de interação entre os elétrons incidentes e o material.....	60

Figura 17: Diagrama de Bode do cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO (99,9%) do eletrodo imerso em 0,05 mol. L ⁻¹ de NaCl, após 15 minutos de imersão.....	63
Figura 18: Diagrama de Bode de alumínio AA ASTM 6060-T5 (99,9%) do eletrodo imerso em 0.05mol.L ⁻¹ de NaCl, após 15 minutos de imersão.....	64
Figura 19: Diagrama de Bode de eletrodos da solda conjunta FSW do tipo alumínio-cobre imerso em 0.05mol.L ⁻¹ NaCl, após 15 minutos de imersão.....	65
Figura 20: Diagrama de Bode do cobre (99,9%), alumínio (99,9%) e junta soldada FSW do tipo alumínio-cobre tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano e imerso em 0,05 mol .L-1 de NaCl, após 15 minutos de imersão.....	65
Figura 21: Polarização da liga de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO sem tratamento e com o revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.....	67
Figura 22: Polarização da liga de alumínio AA ASTM 6060-T5 sem tratamento e com o revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.....	68
Figura 23: Polarização da junta soldada FSW do tipo Alumínio-Cobre sem tratamento e com o revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.....	69
Figura 24: Microscopia por MEV da liga de alumínio AA ASTM 6060-T5 não tratada com magnificação de 3000x.....	71
Figura 25: Microscopia por MEV da liga de Alumínio AA ASTM 6060-T5 tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano com magnificação de 1000x.....	72
Figura 26: Microscopia por MEV da liga de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO não tratada com magnificação de 3000x.....	73
Figura 27: Microscopia por MEV da liga de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano com magnificação de 1000x....	74
Figura 28: Microscopia por MEV da junta soldada FSW do tipo Alumínio AA ASTM 6060-T5/Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO não tratada com magnificação de 3000x.....	75
Figura 29: Microscopia por MEV da junta soldada de Alumínio AA ASTM 6060-T5/ cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano com magnificação de 1000x.....	76
Figura 30: Mecanismo de proteção de corrosão.....	77
Figura 31: MEV com análise EDS para a liga de Alumínio AA ASTM 6060-T5 não tratado (a) e tratado (b) com o 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.....	77
Figura 32: MEV com análise EDS para a liga de Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ não tratado (a) e tratado (b) com o 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.....	78

Figura 33: MEV com análise EDS para a junta soldada FSW de Alumínio 6060-T5 / Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO conjunta não-revestida em diferentes posições.....79

Figura 34: MEV com análise EDS para a junta soldada FSW do tipo Alumínio 6060-T5 /Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO 110 revestida com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.....80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação das principais ligas metálicas não-ferrosas susceptíveis corrosão intergranular.....	41
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio.....	46
Tabela 2 – Composição Química da liga de alumínio.....	46
Tabela 3 – Propriedades mecânicas da liga de cobre.....	46
Tabela 4 – Composição química da liga de cobre.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – The American Society of Mechanical Engineers

AWS – American Welding Society

EDS – Espectrômetro de energia dispersiva de raio-X

FSW – Friction Stir Welding

TWI – The Welding Institute

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE QUADROS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XII
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Contextualização do tema, do problema e da questão de pesquisa	17
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Estrutura do trabalho	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Processos de Soldagem	21
2.1.1 Processos de Soldagem por Fusão	21
2.1.1.1 Soldagem a Arco	22
2.1.1.1.1 Soldagem a Arco com Eletrodos Revestidos	22
2.1.1.1.2 TIG	22
2.1.1.1.3 MIG/MAG	23
2.1.1.1.4 Soldagem com Arame Tubular	23
2.1.1.1.5 Soldagem com Arame Submerso	23
2.1.1.1.6 Soldagem a Plasma	24
2.1.1.2 Soldagem por Eletroescória	24
2.1.1.3 Soldagem Oxi-Gás	25
2.1.1.4 Soldagem com Feixe de Elétrons	25
2.1.1.5 Soldagem a Laser	25
2.1.2 Processos de Soldagem por Pressão (ou Deformação).....	25
2.1.2.1 Soldagem por Resistência	26
2.1.2.2 Soldagem por Centelhamento	26
2.1.2.3 Soldagem por Alta Frequência	26
2.1.2.4 Soldagem por Difusão	27
2.1.2.5 Soldagem por Explosão	27

2.1.2.6	Soldagem por Ultrassom	28
2.1.2.7	Soldagem por Fricção	28
2.1.2.7.1	Soldagem por Fricção convencional	28
2.1.2.7.2	Soldagem por Fricção FSW	30
2.2	Cobre e suas propriedades corrosivas	33
2.3	Alumínio e suas propriedades corrosivas	35
2.4	Propriedades corrosivas da junta alumínio-cobre	37
2.4.1	Corrosão galvânica	37
2.4.2	Corrosão intergranular	39
2.5	Revestimentos	42
2.5.1	Silanos	42
3	METODOLOGIA	44
3.1	Materiais	44
3.2	Preparação das Amostras	46
3.3	Ensaio de Corrosão	47
3.3.1	Impedância	47
3.3.1.1	Medida da Impedância AC em Sistemas Eletroquímicos	47
3.3.1.2	Análise dos Resultados de Impedância eletroquímica	48
3.3.2	Curvas de Polarização	50
3.3.2.1	Levantamento das Curvas de Polarização Experimentais	53
3.3.2.2	Curvas de Tafel	54
3.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	Caracterização Eletroquímica	61
4.2	Medidas de Polarização	65
4.3	Caracterização Por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	69
5	CONCLUSÕES	80
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICES	86
	ANEXOS	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema, do problema e da questão de pesquisa

A corrosão está presente nos materiais metálicos em geral e, em especial envolvidos nas diversas atividades industriais. A deterioração destes, é causada pela interação físico-química entre material e o meio corrosivo, onde causa grandes problemas nas mais variadas atividades (DAVIS, 2000).

Juntas de cobre e alumínio são imprescindível para determinadas aplicações na indústria aeroespacial, transporte e energia elétrica, em virtude de performances singulares como, maior condutividade elétrica, alta condutividade térmica, resistência a corrosão e também por ter ótimas propriedades mecânicas (MAALEKIAN, 2007).

A união de alumínio e cobre por fusão convencional, não é adequada, em virtude às enormes diferenças de propriedades físicas e químicas dos mesmos. Além do mais, a fácil formação de compostos intermetálicos é esperada na junta soldada por fusão devido à alta afinidade entre alumínio e o cobre, o que danifica seriamente as propriedades mecânicas (TAN, 2013).

Várias técnicas de soldagem, como soldagem por explosão e soldagem por fricção convencional, foram desenvolvidas como processos de união opcionais para se unir Alumínio e Cobre. Entretanto, desvantagens como grande limitações no desenho da junta e custo elevado do procedimento tem restringido a sua aplicação na indústria (GENEVOIS, 2011).

No presente estudo, cobre e alumínio foram unidos pelo processo de soldagem a fricção do tipo FSW (Friction Stir Welding).

O processo de soldagem por fricção do tipo FSW, técnica relativamente nova, sendo patenteada pelo instituto de solda (TWI) em 1991, está criando um grande interesse na comunidade industrial como possível alternativa a soldagem por fusão (THOMAS et al., 1991).

Este baseia-se na união no estado sólido, isto é, não existe a fundição do metal, no qual uma ferramenta rotatória, provida de movimento de translação, corre ao longo de uma linha de contato entre os materiais a serem soldados, criando

assim uma união completa por intermédio da severa deformação plástica afetada pela ferramenta (SILVA et al, 2010).

A soldagem por atrito FSW tem vários benefícios, tais como, a baixa distorção, uma maior resistência de solda em comparação com o processo de soldagem por fusão, pouca ou nenhuma porosidade, pouco ou nenhum reparo pós-solda, melhoria na resistência à corrosão e um baixo custo de produção (REYNOLDS, 2003).

Nos dias atuais, a técnica FSW já é muito usada para unir ligas de alumínio, produzindo soldas de qualidade excelente.

O número de materiais unidos pela FSW está aumentando gradativamente, começando a incluir também a soldagem por esta técnica em materiais dissimilares. Juntas soldadas são especificamente sujeitas à corrosão (ataque eletroquímico, destrutivo e não intencional de um metal), quando expostas ao ambiente e mais singularmente em soldagem de materiais diferentes (REYNOLDS, 2003).

A grande maioria dos materiais sofre algum tipo de interação com um grande número de ambientes diversos. Com assiduidade, tais interações comprometem a utilidade de um material com resultado da deterioração das suas propriedades mecânicas (por exemplo, ductilidade e resistência), de outras propriedades física, ou do próprio visual. Casualmente, para o descontentamento de um engenheiro de projetos, o comportamento de deterioração de um material para uma dada aplicação é ignorado, com consequências diversas. Em metais, as perdas são significativas para uma dada aplicação. O problema de corrosão metálica, apresenta proporções consideráveis; em termos econômicos, foi previsto que aproximadamente 5% da receita de um país industrializado são gastos na precaução da corrosão e na substituição de produtos perdidos ou contaminados como resultado de reações de corrosão (CALLISTER, 2002).

Baseado nesse cenário, o presente trabalho tem como tema verificar o comportamento corrosivo de soldas à fricção FSW do tipo alumínio-cobre.

Conhecendo-se bem os tipos de corrosão que agem nesse tipo de soldas e entendendo bem seus mecanismos, torna-se possível medidas para prevenir a ocorrência de tal fenômeno (CALLISTER, 2002).

Um revestimento ou uma camada de conversão para inibir a corrosão de um metal, é um processo moderadamente simples de se fazer, mas falando de materiais dissimilares é extremamente complexo por poder acarretar uma pilha de corrosão e,

em vez de inibir, acaba ocorrendo o processo inverso. Logo, o questionamento é, qual o revestimento ou a camada de conversão mais eficiente para ambos os metais?

Yilbas et al. (1995) investigou as propriedades mecânicas do processo de soldagem por fricção de aço alumínio e barra de alumínio e cobre por meio de análise fatorial; Rhodes et al. (1997) examinou microestruturas de alumínio 7075 utilizando soldas por fricção; Ouyang et al. (2006) investigou a evolução estrutural na soldagem por fricção da liga alumínio T6 6061 e cobre; Vilaça (2003) estudou as características metalúrgicas e de corrosão no processo de soldagem a fricção do alumínio 5083-H111.

Apesar de tais estudos, ainda não foi abordado o comportamento corrosivo de soldas à fricção FSW do tipo alumínio-cobre.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo geral promover a proteção contra a corrosão de uma junta soldada a fricção FSW alumínio/cobre do tipo AA 6060 T5/Cu ASTM B-187 C110-TÊMPERA 1/2 DURO com um tratamento à base de 3-Glinoxipropil-trimetoxi-silano.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o comportamento eletroquímico do alumínio ASTM AA 6060 T5 através da medida de potencial de corrosão, polarização anódica e catódica mediante a curva de Tafel.
- Descrever o comportamento eletroquímico do cobre ASTM B-187 C110-TÊMPERA 1/2 DURO através da medida de potencial de corrosão, polarização anódica e catódica mediante a curva de Tafel.
- Determinar o comportamento eletroquímico da junta soldada de alumínio ASTM AA 6060 T5 e cobre ASTM B-187 C110-TÊMPERA 1/2 DURO através da

medida de potencial de corrosão, polarização anódica e catódica mediante a curva de Tafel.

- Propor um tratamento anticorrosivo eficiente para soldas à fricção FSW do tipo alumínio-cobre à base de 3-Glixidoxipropil-trimetoxi-silano.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho divide-se em cinco capítulos:

Capítulo 1 - Apresenta a introdução, contextualização do tema, do problema e da questão de pesquisa, os objetivos geral e específicos e a justificativa do trabalho;

Capítulo 2 - Apresenta a revisão bibliográfica detalhada sobre o assunto, com uma breve descrição sobre os principais processos de soldagem, sendo que uma visão mais detalhada do processo de soldagem à fricção adotado para referente pesquisa. O capítulo aborda também, uma caracterização sobre as propriedades corrosivas do cobre, do alumínio e da junta soldada do tipo alumínio-cobre; e por fim, uma revisão sobre a corrosão galvânica e intergranular.

Capítulo 3 – Elucida os métodos de trabalho que serão abordados para o desenvolvimento do projeto. As principais etapas utilizadas são a definição dos materiais utilizados, os detalhamentos que serão necessários e as análises previstas em ensaios de laboratório, definindo assim, os dados necessários para as conclusões do presente trabalho.

Capítulo 4 – Apresenta os resultados e as discussões.

Capítulo 5 – Expõe as principais conclusões do referente trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processos de Soldagem

Soldagem, na visão da American Welding Society (AWS), é a operação que consiste em obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e de metal de adição (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).

O grande benefício da soldagem, trata-se da perspectiva de obtenção de uma união em que os materiais apresentem uma continuidade não somente na aparência externa, mas também em suas características, propriedades químicas e mecânicas, relacionadas à sua natureza interna (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

De acordo com Weiner (1992), processos onde ocorre a união de dois ou mais materiais com fornecimento de energia, criando um meio metálico contínuo, são denominados de processos de soldagem.

Para Houdcroft (1979), cada processo de soldagem deve atender aos seguintes requisitos:

- gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais, similares ou não.
- remover as contaminações das superfícies a serem unidas.
- evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem.
- propiciar o controle da transformação de fase, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas.

Diferentes processos estão ligados ao termo Soldagem e uma das formas de classificação de tais processos, relaciona dois grandes grupos baseando-se no método imperante para produzir a solda (MARQUES; MODONESI, 2000).

2.1.1 Processos de Soldagem por Fusão

Existe uma gama de processos de soldagem por fusão, podendo ser separados em subgrupos, como por exemplo, segundo o tipo de fonte de energia usada para difundir as peças. Dentre estes, os processos de Soldagem a arco são os que têm um maior destaque industrial na atualidade (MARQUES; MODONESI, 2000).

2.1.1.1 Soldagem a Arco

Para Wainer (1992) soldagem a arco utiliza como fonte de calor para fusão detectada, o arco que nada mais é que uma descarga elétrica em um meio gasoso no qual se encontra parcialmente ionizado. No grande maioria dos casos, o arco elétrico é mantido entre um metal base e o eletrodo cilíndrico, existindo, no entanto, processos em que o metal base não faz parte do circuito elétrico ou ainda que utilizam eletrodos de diferentes formas ou até mesmo diversos eletrodos concomitantemente.

Nos processos de soldagem a arco, a dose de calor fornecida à junta, as dimensões e também o formato do cordão de solda, são dependentes da tensão e corrente elétricas concedidas ao arco e, e em sua grande maioria, tais processos também dependem da velocidade de soldagem.

2.1.1.1.1 Soldagem a Arco com Eletrodos Revestidos

A soldagem a arco com eletrodos revestidos têm como definição ser um processo no qual a união é produzida pelo calor do arco criado entre a peça a ser soldada e um eletrodo revestido (WAINER, 1992; GEARY, MILLER, 2013)

Ter um equipamento simples, barato e portátil, e também ser um processo multifuncional em termos de materiais soldáveis, são algumas das vantagens do processo. Em contrapartida a sua produtividade é um tanto baixa.

A área de aplicações dos eletrodos revestidos, atualmente é a mais extensa entre todos os processos de soldagem, podendo ser usado para soldar o níquel, o alumínio e também o ferro fundido.

2.1.1.1.2 TIG

Okumura (1982) descreve que TIG é um processo de soldagem que tem como fonte de calor um arco elétrico, mantido entre a peça a ser soldada e um eletrodo não consumível de tungstênio. A soldagem pode ser realizada com ou sem o uso de metal de adição, podendo ser de forma manual, ou até mesmo automática.

Na atualidade, o processo TIG é utilizado em grande escala na soldagem de ligas de alumínio, de magnésio, de titânio, e aços inoxidáveis, entre outros. A solda desse tipo de processo é considerada de muito boa qualidade (WAINER, 1992).

2.1.1.1.3 MIG/MAG

Conforme Geary (2013) os processos MIG e MAG, como fonte de calor fazem o uso de um arco elétrico que é mantido entre um eletrodo nu consumível, alimentado constantemente e a peça a soldar.

O processo MIG é compatível à soldagem de aços-carbono, aços de baixa, média e alta liga, alumínio e suas ligas, aços inoxidáveis, magnésio e suas ligas. Já o processo MAG é conveniente na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga.

Os processos possuem uma alta velocidade de soldagem e facilidade de execução, porém, há uma alta emissão de raios ultravioletas.

2.1.1.1.4 Soldagem com Arame Tubular

Processo pelo qual a aglutinação dos metais é atingida pelo aquecimento destes por um arco entre eletrodo tubular contínuo e a peça (OKUMURA, TANIGUCHI, 1982; WAINER, 1992).

O eletrodo tubular apresenta no seu interior um fluxo que desempenha funções equivalentes ao revestimento de um eletrodo do processo MIG/MAG, ou seja, estabilização do arco, acerto da composição da solda, proteção, entre outras.

A soldagem com arame tubular tem como relevante vantagem a sua alta eficiência e produtividade (OKUMURA, TANIGUCHI, 1982).

2.1.1.1.5 Soldagem com Arame Submerso

Soldagem ao Arco Submerso, procedimento onde se tem a união dos metais sendo produzida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo metálico constante e a peça a ser soldada (WAINER, 1992; MARQUES, MODONESI, 2000).

O arco neste processo é protegido por uma camada de material fusível granulado que é posicionado sobre a peça enquanto o eletrodo, na forma de arame, é mantido constantemente.

A soldagem com arame submerso nos dias atuais, é bastante utilizada para se soldar estruturas de aço, e também na fabricação de tubulações (WAINER, 1992).

2.1.1.1.6 Soldagem a Plasma

Para Geary (2013), soldagem a plasma é o processo que faz uso do arco operando em condições especiais, atuando como fonte bastante estável de calor o que permite a soldagem de grande parte dos metais com espessuras variando de 0,02 a 6 mm.

A grande vantagem da soldagem a plasma é a aplicação possível na grande maioria dos metais e também em muitos materiais não metálicos, em contrapartida, seu custo é demasiadamente elevado e a complexidade do processo reduz seu uso para aplicações de indústrias de alta tecnologia, onde sua utilização se torna justificável (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

2.1.1.2 Soldagem por Eletroescória

Processo de soldagem que faz uso da passagem de uma corrente elétrica por meio de resíduos condutores fundidos para, a partir daí, gerar o calor essencial à fusão localizada da junta e do metal de adição (WAINER, 1992; GEARY, MILLER, 2013).

O metal de base adjunto e a solda apresentam uma estrutura de tenacidade um tanto baixa e de granulação bastante grosseira, tendo que na maioria de suas aplicações fazer o uso de um tratamento térmico de normalização, de forma a haver um refino da estrutura.

Tal processo é bastante usado, considerado até primário para união de duas ou mais peças de grande espessura.

2.1.1.3 Soldagem Oxi-Gás

A soldagem por oxi-gás faz uso do emprego do calor fornecido por uma chama de combustível gasoso e oxigênio para fundir o metal de base e, se usado, o metal de adição. Este processo é utilizado na maioria das vezes manualmente, mas existem aplicações mecanizadas (OKUMURA, TANIGUCHI, 1982; MARQUES, MODONESI, 2000; GEARY, MILLER, 2013; entre outros). Na soldagem de aços e outras ligas, Variados tipos de gases combustíveis podem ser utilizados, sendo como mais comum, acetileno (C₂H₂).

2.1.1.4 Soldagem com Feixe de Elétrons

Conforme Marques (2000) soldagem com feixe de elétrons é o processo fundamentado na fusão localizada da junta mediante a um bombardeio de um feixe de elétrons com alta velocidade. O feixe de elétrons é lançado por um canhão eletrônico e focalizado, por intermédio de lentes eletromagnéticas, em uma região pequena da junta, o que possibilita uma concentração de energia muito elevada. Uma das grandes vantagens deste processo é a baixa energia resultante da soldagem, ocasionando uma minimização de problemas de contração e distorção da junta, propiciando, assim, trabalhar com peças já usinadas.

2.1.1.5 Soldagem a Laser

Processo de soldagem fundamentado na fusão localizada da junta por meio de um bombardeio de luz concentrada coeso e monocromático de alta intensidade. Este tipo de processo é adequado para aplicações automatizadas devido a sua alta velocidade, em contrapartida o custo do equipamento é elevado fazendo com que este tipo de processo seja mais utilizado em aplicações de larga escala ou em aplicações mais críticas (WAINER, 1992; GEARY, MILLER, 2013).

2.1.2 Processos de Soldagem por Pressão (ou Deformação)

Este grupo contém os processos de soldagem por resistência, por centelhamento, por alta frequência, por fricção ou atrito, por explosão, por ultrassom, entre outros. Vários destes processos, apresentam características intermediárias

entre os processos de soldagem por fusão e por deformação, como é o caso do processo de soldagem por resistência. Em termos de classificação, estes processos serão inseridos neste grupo (WAINER, 1992).

2.1.2.1 Soldagem por Resistência

Na soldagem por resistência, o calor fundamental para haver formação da junta soldada é adquirido pela resistência à passagem da corrente elétrica por intermédio das peças soldadas (OKUMURA, TANIGUCHI, 1982;). Quando se tem o aquecimento da região da junta pela passagem da corrente elétrica, a resistência mecânica do material diminui permitindo, por meio de uma aplicação de pressão, a soldagem por deformação da junta.

2.1.2.2 Soldagem por Centelhamento

Neste tipo de processo as peças a serem soldadas são colocadas muito próximas sem as suas superfícies entrarem em contato. Liga-se a energia elétrica e, então, as peças são postas em movimento de forma a ficarem bastante próximas a uma constante velocidade. Tal movimento ocasiona o contato elétrico das superfícies a serem soldadas, ocorrendo a formação da centelha. Após certo tempo, com a ação da centelha, quando as superfícies que forem ser unidas estiverem aquecidas, a corrente de soldagem é desligada e peças são fortemente pressionadas uma contra as outras, sofrendo deformação plástica na superfície da junta o que torna possível a formação deste tipo de solda (WAINER, 1992; MARQUES, MODONESI, 2013). Este processo é empregado na fabricação de rodas de carros e caminhões, na união de trilhos e também em tubulações. Em contrapartida, o processo tem como desvantagem ser demasiadamente complexo e possuir equipamento de difícil manuseio.

2.1.2.3 Soldagem por Alta Frequência

De acordo com Geary (2013), na soldagem por alta frequência são empregadas bobinas por onde uma corrente de alta frequência trafega causando o aparecimento de correntes induzidas na região da junta da peça que está sendo

soldada. Tais correntes fazem o aquecimento da junta por efeito joule o que favorece a deformação localizada e a formação da solda com a utilização da pressão. Tal processo é amplamente usado na fabricação de tubos e perfis de aço de parede de pequena espessura, podendo também ser usado em tubos com parede de grande espessura, sendo utilizado de forma mecanizada ou automatizada.

2.1.2.4 Soldagem por Difusão

Conforme Wainer (1992) a soldagem por difusão é um processo de união que se dá no estado sólido produzindo a solda pelo emprego de uma pressão em uma temperatura elevada sem que se tenha uma deformação macroscópica das peças.

Este processo é recomendado quando se quer ter uma aplicação mais restrita, como por exemplo, evitar problemas metalúrgicos relacionados com a soldagem por fusão ou ainda a fabricação de componentes com dimensões e forma muito próximas das almeçadas para o produto final.

Tal Processo não é recomendável pelo seu alto custo, só se tornando economicamente viável quando as dimensões da peça a ser soldada tiverem uma grande exigência ou ainda quando for utilizado materiais especiais. Vale destacar que suas aplicações são muito limitadas (MARQUES; MODONESI, 2000).

2.1.2.5 Soldagem por Explosão

Para Okumura (1982) a soldagem por explosão, é um processo onde se emprega a energia de detonação de um explosivo para, a partir disso promover a união de peças metálicas. Este processo pode ser aplicado para união de quase todos os metais e ligas que possuam uma ductilidade suficiente para não se desfazer durante a explosão. Este processo de soldagem por explosão é bastante utilizado na indústria para a fabricação de chapas metálicas, revestimentos e também para a junção de metais que são liturgicamente incompatíveis em processos de soldagem por fusão.

2.1.2.6 Soldagem por Ultrassom

Na soldagem por ultrassom a união das peças é feita pela utilização localizada de energia vibracional de alta frequência com as peças mantidas sob pressão. A coalescência se dá pelo aquecimento e deformação plástica localizada das superfícies que estão em contato (OKUMURA, TANIGUCHI, 1982; GEARY, MILLER, 2013). Este processo é frequentemente aplicado para soldar juntas justapostas de metais dúcteis, semelhantes ou não, de espessura pequena, bem como para a união de plásticos, como por exemplo, na fabricação de embalagens e indústria eletrônica.

2.1.2.7 Soldagem por Fricção

O referente trabalho fará uso desta técnica de soldagem, a qual será abordada com mais detalhes.

2.1.2.7.1 Soldagem por Fricção convencional

A soldagem por fricção ou soldagem por atrito, faz o uso de algo bastante comum para algumas situações do dia a dia, que é o atrito. Não é de hoje que se sabe que o atrito gera calor, mas a aplicação para unir metais só é datada em 1891, quando a primeira patente deste tipo de processo de junção foi autorizada nos Estados Unidos da América. No ano de 1929 foi registrada a primeira patente alemã; de 1941 a 1944 a Inglaterra também desenvolveu e registrou uma sucessão de patentes sobre tal processo e em 1956 a extinta União Soviética também registrou seu desenvolvimento. Como consequência disto, vários outros países desenvolvidos industrialmente estiveram estudando e aperfeiçoando o processo de soldagem por fricção com a intenção de se obter uma ampliação e um melhoramento em sua aplicação (SILVA et al., 2010).

De acordo com Marques (2000) a soldagem por fricção é um processo de soldagem no estado sólido, do qual o aquecimento causa a ligação entre as partes a serem soldadas. Tal aquecimento é gerado devido a rotação de uma das partes condicionadas sob certa pressão contra a outra, que está fixa.

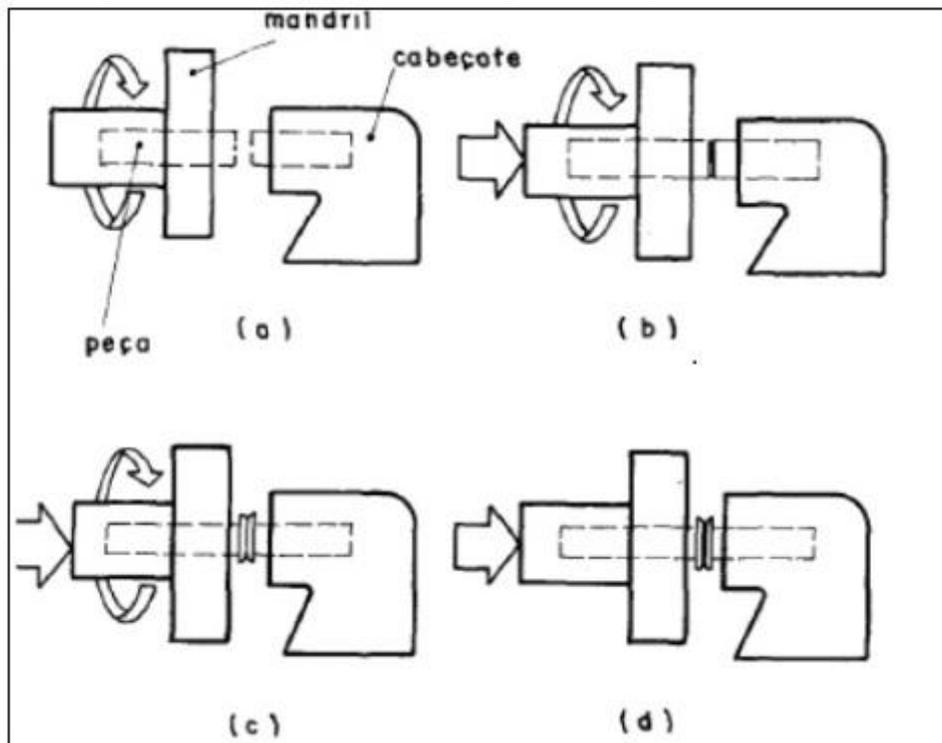
Em virtude do atrito entre as partes, a energia cinética se transforma em calor, sendo absorvido pela região próxima às superfícies em contato, unindo as

superfícies, uma pressão é aplicada e a ação da força centrífuga faz fluir o metal para fora dos limites da peça na forma de rebarba, arrastando os óxidos superficiais existentes. Toda a energia gasta para fluir o metal coalescido, impede que fases líquidas sejam formadas.

Geralmente, as juntas soldadas por este tipo de processo têm características metalúrgicas e mecânicas superiores à, no mínimo, um dos metais envolvidos na junta (GEARY, MILLER, 2013).

A Figura 1 ilustra o arranjo mais comum de um processo de soldagem por fricção do tipo convencional.

Figura 1 – sequência de soldagem à fricção convencional



Fonte: Wainer (1992, p.318)

Na Figura 1 pode-se perceber, na parte “a”, que o mandril é girado até se obter a rotação almejada. Em “b” aplica-se a pressão a medida que o cabeçote se aproxima do mandril. Na parte “c” tem-se a fase do aquecimento e em “d” a fase do forjamento.

A soldagem por fricção possibilita soldar materiais diferentes, com pontos de fusão também diferentes, já que o resultado da soldagem não é fusão e sim caldeamento. Este tipo de soldagem torna-se difícil quando tivermos materiais com

baixos coeficientes de atrito, já no caso dos ferros fundidos a grafita é um agravante, agindo como lubrificante (SILVA et al., 2010).

Inúmeras são as vantagens deste processo tais como: Não é necessária a utilização de metal de adição; No geral, não se faz necessidade de cuidados especiais na manipulação das superfícies das peças que serão soldadas; Fácil controle dos parâmetros de processo, sendo possível seu controle por completo, podendo ser aplicada até mesmo em produção em série; Pode-se soldar metais com geometrias diversas (MARQUES, MODONESI, 2000; OKUMURA, TANIGUCHI, 1982; WAINER, 1992; entre outros).

Já quando se trata das desvantagens, pode-se citar como exemplos: Deve-se haver sempre um eixo de simetria na peça em rotação; Quando se trata de materiais como o alumínio, cobre e aço inoxidável deve-se sempre considerar a preparação das superfícies destes materiais; Quando materiais apresentam defeitos de laminação eles podem causar uma série de problemas (MARQUES, MODONESI, 2000; OKUMURA, TANIGUCHI, 1982; WAINER, 1992; entre outros).

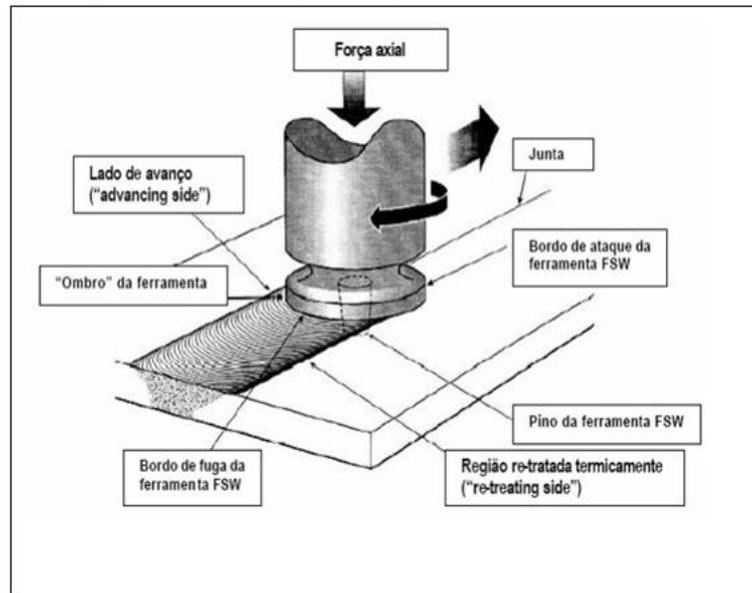
2.1.2.7.2 Soldagem por Fricção FSW

A tecnologia FSW nasceu na TWI (The Welding Institute) em 1991, na Inglaterra, mas especificamente na cidade de Cambridge, inicialmente foi vista como uma curiosidade de laboratório, antes que passasse a motivar a atenção da indústria (WAINER, 1992).

O processo de soldagem FSW, é um processo de união no estado sólido, isto é, não existe a fundição do metal, no qual uma ferramenta rotatória, provida de movimento de translação corre ao longo de uma linha de contato entre os materiais a serem soldados, criando assim uma união completa por intermédio da severa deformação plástica afetado pela ferramenta (SILVA et al, 2010).

A Figura 2 ilustra o princípio do processo FSW.

Figura 2 – Princípio do processo FSW.



Fonte: Genicolo (2007, p.24)

Nos dias atuais, inúmeras indústrias já utilizam o processo de soldagem por fricção FSW, tendo como objetivo a redução de tempos de preparo e diminuição de custos, o que ocasiona um aumento da qualidade de seus produtos.

As principais indústrias que utilizam este processo são (SILVA et al, 2010):

- aeroespacial
- equipamentos pesados
- nuclear
- automotiva
- elétrica
- construção
- marinha
- química

Para Silva (2010), existe inúmeros outros setores da indústria que já se beneficiam do processo FSW, ainda assim não de forma definitiva, pois estão em fase de pesquisas e adequação. No setor da metalmecânica as aplicações são as mais diversas, sendo de simples uniões para fabricação de armações de óculos até tubos de perfuração com largos diâmetros.

Cita-se, na sequência, alguns exemplos de aplicações (SILVA et al, 2010):

- suportes do alternador;
- Eixos;

- Cubos para montagem de polias;
- Cames de freio;
- Válvulas borboletas;
- Cabos com juntas de alumínio e cobre;
- Pinhões diferenciais;
- Válvulas de exaustão;
- Presilhas para bielas;
- Engrenagens compostas;
- Braços de suspensão;
- Tubo de perfuração;
- Válvulas de escape;
- Eixos de ventilador;
- Flanges para buchas de montagem;
- Flange para tubo de montagem;
- Corpo de cilindros hidráulicos;
- Camisas para cilindros;
- Vasos de pressão;
- Flanges de válvulas;
- Rodas;
- Juntas universais;
- Volantes para tubos de montagem;
- Ponta de eixo do diferencial;
- Alavancas de câmbio;
- Engrenagem para eixo de acionamento;
- Cavilha de gancho;
- União de mangueiras;
- Máquina de abrir rasgo de chaveta;
- Tubos de distribuição;
- Fresas;
- Engrenagens de bomba de óleo;
- Rolos de máquinas de papel;
- Bielas;
- Eixos de motores e bombas;
- Pistões e engrenagens de bombas;

- Corpos para absorver impactos;
- Pinhão de partida;
- Colunas de direção;
- Entre outros.

Para Genicolo (2007) em estado sólido a trabalhabilidade do processo FSW acarreta várias vantagens sobre métodos de soldagem de fusão, assim, evitando problemas associados ao resfriamento da fase líquida. É notado de uma forma geral, o processo FSW produz pequena concentração de defeitos, suportando variação de parâmetros na soldagem e composição de materiais. O processo FSW oportuniza unir ligas antes consideradas impróprias para soldagem e também permite a união de materiais dissimilares sem implicar problemas de corrosão praticamente. Em contrapartida, a FSW é associada a diversos defeitos característicos como temperatura de soldagem insuficiente, devido à elevada velocidade de avanço ou a baixa rotação.

2.2 Cobre e suas propriedades corrosivas

O cobre é um dos metais mais abundantes da crosta terrestre o que se traduz em custos não muito elevados. Este metal é utilizado desde os primórdios da civilização. Foram encontrados artefatos de cobre ainda no seu estado original, mesmo depois de ter ficado na terra por milhares de ano (MENNUCCI, 2011).

De todos os metais comuns o cobre é o que mostra a mais alta classificação para condutividade elétrica e térmica, facilitando a sua aplicação nas mais diversas indústrias, tais como, de eletroeletrônicos, de telecomunicações, automobilística, entre outros (TOLEDO, 2005; CASPERS, 2012).

Para Toledo (2005) o cobre além de ter propriedades térmicas e elétrica, ele apresenta excelente resistência a corrosão devido a formação de uma película de óxido realmente passiva. Esse tipo de material resiste a muitas soluções salinas, alcalinas e a produtos químicos orgânicos. Em contrapartida, o cobre é propenso a uma oxidação mais rápida na oxidação de ácidos, sais de metais oxidantes fortes, enxofre e amônia.

Em ambientes aquosos e a temperatura ambiente, o produto de corrosão dominante é responsável por dar proteção ao óxido de cobre (Cu_2O). Esta película de Cu_2O é aderente e cresce de uma maneira parabólica (MENNUCCI,2011;).

No diagrama de pourbaix para o cobre ilustrado pela Figura 3, é possível apontar os seguintes compostos (TOLEDO, 2005; MENNUCCI, 2011):

– Gases: H_2 e O_2 ;

Região de imunidade → região de cobre;

Regiões passivas → formação de espécies sólidas insolúveis: Cu_2O e CuO ;

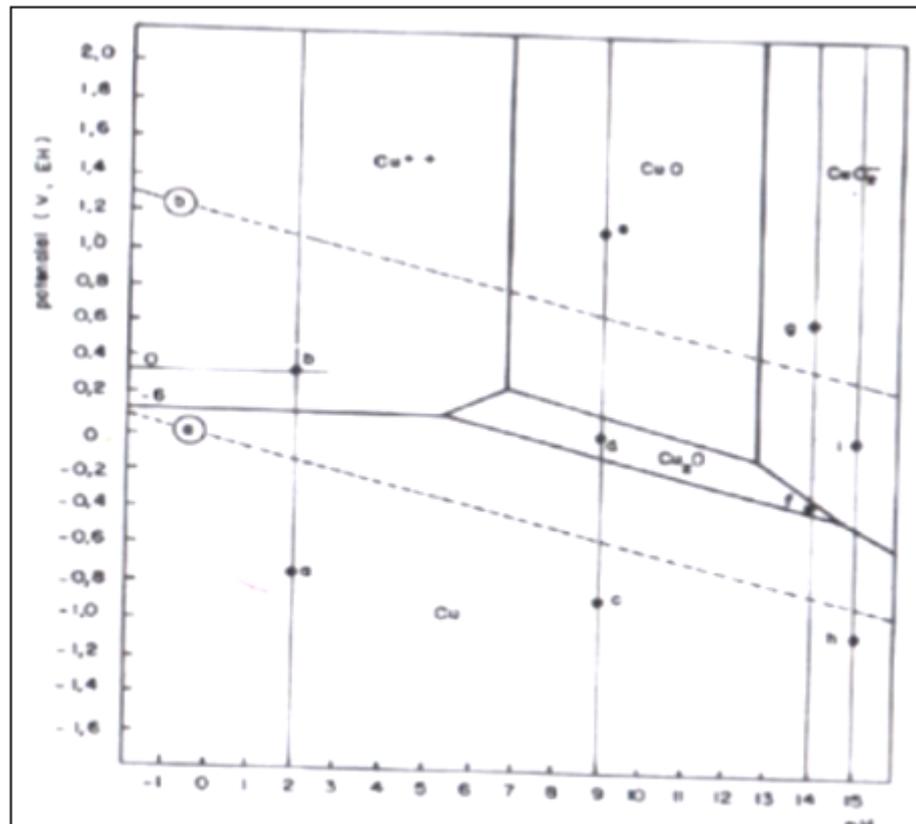
Regiões de corrosão → espécies solúveis formando íons Cu^+ , Cu^{++} , HCuO_2^- , CuO_2^- ;

– $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{++} + 2\text{e}$ (cátion)

– $\text{Cu} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CuO}_2^- + 4\text{H}^+ + 2\text{e}$ (ânion)

– $\text{Cu}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CuO}_2^- + 6\text{H}^+ + 2\text{e}$ (ânion)

Figura 3 – Diagrama de Pourbaix do Cobre.



Fonte: Ramanthan (1998, p.45).

Para a reação de corrosão avançar, os íons de cobre e os elétrons devem migrar através da película de Cu_2O . Desse modo, reduzir a condutividade iônica e da

película com cátions bivalentes e trivalentes deve melhorar a corrosão (CASPER, 2012).

Na prática são adicionados elementos de liga, tais como o zinco, o alumínio, o estanho, para dopar o filme de produtos de corrosão e, desse modo, diminuir as taxas de corrosão consideravelmente (MENNUCCI, 2011).

2.3 Alumínio e suas propriedades corrosivas

O alumínio, como o cobre, é um dos metais em maior quantidade na crosta terrestre, o que auxilia o seu uso em escala muito alta. O alumínio, devido às suas propriedades, é utilizado em várias aplicações, desde as mais simples embalagens de alimentos, até mesmo na indústria automobilística e aeronáutica, entre outras (HOLZLE, 2005).

Santos (2011) destaca que as suas propriedades o tornam atraente para as mais diversas aplicações, pois ele apresenta baixa densidade, elevada resistência mecânica e o seu custo é baixo.

Obtido através da bauxita, o alumínio passa por processos de mineração, refinação para a obtenção da alumina e então acontece uma redução da mesma em alumínio metálico. Tal processo abrange um elevado consumo de energia, cerca de 15 MWh por tonelada de alumínio produzido (SANTOS, 2011).

A energia colocada para sua obtenção, na forma metálica, representa também sua elevada tendência a retornar ao estado oxidado. Posteriormente a redução do óxido em metal, existem vários processos, tais como: estampagem, laminação, trefilação, extrusão, forjamento, soldagem e usinagem antes do seu uso final (ABAL, 2007). Esses processos alteram a estrutura do alumínio, portanto, modificam também as suas propriedades, sendo uma das mais afetadas a sua resistência à corrosão.

O alumínio sofre corrosão tanto em um meio ácido como num meio alcalino, apesar de para $4 < \text{pH} < 9$, equivale a um intervalo de pH comumente encontrado em atmosferas naturais, ocorra uma camada passiva de óxido protetor (DAVIS, 1993; MATTSSON, 1989).

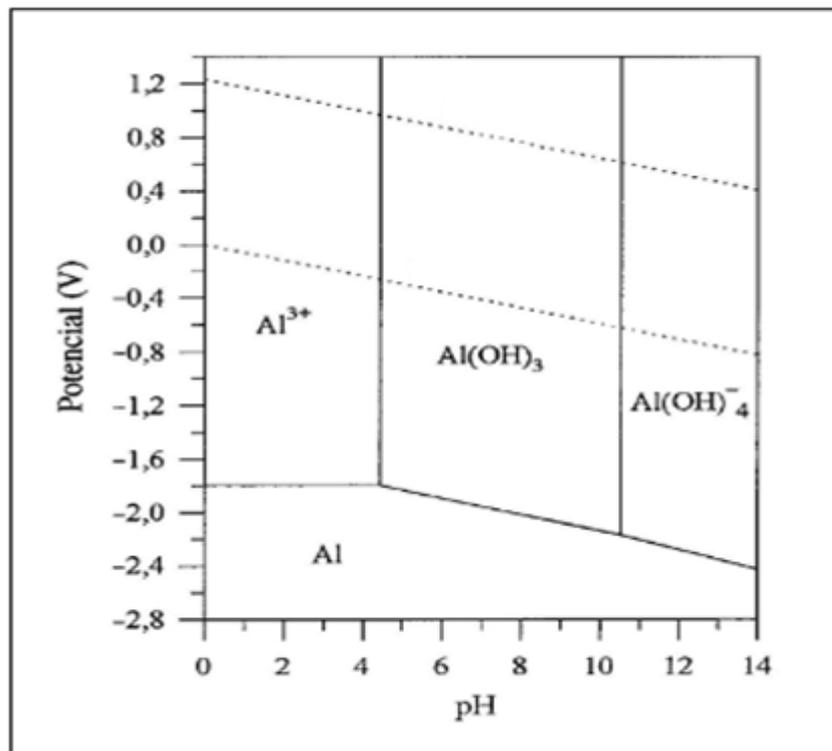
A espessura dessa camada pode variar em função do ambiente, temperatura e até mesmo de elementos de liga. Para os óxidos formados ao ar, à uma temperatura ambiente, as espessuras podem variar entre 2 e 3 nm, ao mesmo

tempo que, quando formados a temperaturas de 425°C aproximadamente, os filmes chegam a atingir até 20 nm de espessura (SHIMIZU, 1991).

Para uso do alumínio em escala industrial são necessárias medidas de proteção para atender às exigências do mercado quanto à vida útil do material, pois em contato com meios que contenham cloretos, este filme se torna instável e não proporciona uma proteção adequada.

O diagrama de pourbaix para o alumínio ilustrado pela Figura 4 apresenta regiões onde ocorrem a passividade, a imunidade e a corrosão do alumínio puro.

Figura 4 – Diagrama de Pourbaix do Alumínio.



Fonte: Gemelli (2001, p.51).

Nota-se, pela Figura 4, que a região onde ocorre a passividade do alumínio em meios aquosos se encontra em um intervalo de pH que varia entre 4 e 10,5. Essa região condiz à estabilidade do óxido do alumínio, que protege o metal contra corrosão. Apesar disso, em regiões onde o pH está abaixo de 4 ou acima de 10,5 essa camada abandona seu caráter protetor, em razão da alta solubilidade deste óxido em meios ácidos, expondo o metal base e levando a processos de oxidação do alumínio (SANTOS, 2011).

As equações eletroquímicas que dirigem a corrosão do alumínio são (SANTOS, 2011):



Nas regiões de intermetálicos das ligas de alumínio, a conexão galvânica favorece as reações (2) e (3). Quando o metal está em contato com a água, hidrogênio ou oxigênio a célula galvânica se completa e deste modo o metal sofre corrosão.

Levando em conta que sempre existirão os pares galvânicos nas ligas de alumínio, já que os intermetálicos estão em contato com a matriz, a maneira de se evitar a corrosão é escapar do contato do eletrólito com a superfície metálica e/ou os reagentes catódicos, mediante de barreiras ou inibidores de corrosão (GENTIL, 1996; RAMANATHAN, 1998; TWITE, 1998).

2.4 Propriedades corrosivas da junta alumínio-cobre

A deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio pode estar ou não correlacionado a esforços mecânicos, os quais chamamos de corrosão. (GENTIL, 1996).

Os efeitos da corrosão em regiões soldadas são tão notórios que facilmente nos deparamos com soldas que ocasionaram falhas em meio corrosivos.

Segundo Ramanathan (1998) os tipos de corrosão mais comuns em soldas são:

- Corrosão Galvânica;
- Corrosão Intergranular;

2.4.1 Corrosão galvânica

A corrosão galvânica ocorre em consequência de uma formação de uma pilha de corrosão galvânica. Quando materiais metálicos dissimilares, com diferentes potenciais, entram em contato em presença de um eletrólito, tende a desaparecer a

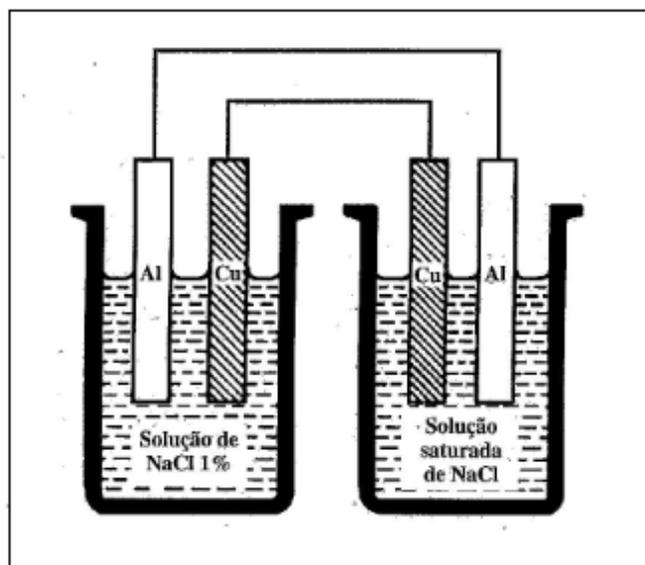
diferença de potencial entre eles em virtude da polarização de cada um, passando assim, circular uma corrente entre ambos, desta forma, há transferência de elétrons, ocasionando tal tipo de corrosão (GENTIL, 1996; GEMELLI, 2001).

A corrosão galvânica e seus processos pode ser uma das formas mais usuais e frequentes de corrosão da natureza, bem com uma das mais ameaçadoras.

Na corrosão galvânica o eletrólito fornece um meio para que ocorra a migração de íons, tornando-se assim possível os íons metálicos moverem-se do ânodo para o cátodo resultando em uma reação do tipo eletroquímica. Isso acarreta à corrosão do metal anódico mais rapidamente do que ocorreria sem tal cenário, e a corrosão do metal catódico é desacelerada até o ponto de parar (GALVELE, 2006).

A Figura 5 mostra o esquema fundamental de uma célula galvânica do tipo alumínio-cobre e seus íons.

Figura 5 – Pilha de Concentração



Fonte: Gentil (1996, p.83).

No caso particular do alumínio com o cobre, sucede a oxidação do alumínio e uma decorrente redução do cobre como mostra a Equação 4 do equilíbrio químico alumínio-cobre (GENTIL, 1996):



As células galvânicas de corrosão podem ser dispostas a nível macroscópico ou então no nível microscópico. Se tratando de um nível microestrutural, as

diferentes fases ou outras características podem estar sujeitas a correntes galvânicas (RAMANATHAN, 1998).

Segundo Fontana (1986) três condições são essenciais para existir corrosão galvânica:

- existir dois metais diferentes eletronicamente presentes;
- haver um caminho eletricamente condutor entre os dois metais;
- existir um caminho para os íons de metal moverem-se do metal mais anódico ao metal mais catódico.

Existem casos em que a reação galvânica é propositadamente incentivada. Por exemplo quando se tem o encapsulamento das baterias de baixo custo (pilhas) usualmente contendo células de carbono zinco. Como parte de um circuito fechado, o zinco dentro de uma célula vai ser corroído preferencialmente (a via iônica). Outro exemplo é a proteção catódica em estruturas enterradas ou submersas. Nessa situação, ânodos trabalham fazendo parte de um par galvânico, promovendo desta maneira a corrosão do ânodo, em vez do material protegido (GALVELE, 2006).

2.4.2 Corrosão intergranular

A corrosão intergranular é o tipo de corrosão responsável pela presença de trincas ao longo dos contornos de grão da estrutura metalúrgica do material (GENTIL, 1996).

A corrosão intergranular possivelmente seja o pior tipo de ataque que um material poderá sofrer, pois sua ocorrência, muitas vezes só será possível de ser identificada quando existir a ruptura do material.

Como o próprio nome sugere, é o ataque preferencial na região do contorno de grão de uma liga. Desta maneira, somente ligas metálicas estão sujeitas a este tipo de corrosão e a sua causa é, geralmente conferida as precipitações de alguns componentes da liga de forma preferencial no contorno de grão.

A natureza mais reativa do contorno do grão, não tem consequências na maioria das aplicações ou uso dos metais. Se um metal se corrói, haverá um ataque uniforme uma vez que os contornos de grãos são preferencialmente um pouco mais reativos que a matriz. Logo, sob certas condições, a interface dos grãos se torna mais reativa o que origina um processo de corrosão intergranular. A liga fragmenta-se e/ou perde sua resistência e tensões (FONTANA, 1986).

Para Callister (2002) a corrosão intergranular acontece de preferência ao longo dos contornos de grão para algumas ligas e em ambientes particulares.

Segundo Panossian (1993), este tipo de corrosão é devido a formação de microcélulas de corrosão vicinais ao contorno de grão. Essas microcélulas, uma vez que, originam-se em virtude de:

- presença de precipitados de segunda fase nos contornos de grão;
- presença de segregações em contorno de grão;
- enriquecimento de uma fina zona adjacente aos contornos por um dos elementos de liga;
- empobrecimento de uma fina zona adjacente aos contornos por um dos elementos de liga;

De acordo com Gemelli (2001) este tipo de corrosão é perigosa, já que a quantidade de metal que se oxida é pequena, mas as características mecânicas do material são modificadas pelas fissuras produzidas em profundidades.

Os compostos existentes nos contornos de grão podem ser menos nobres (Anódicos), mais nobres (Catódicos), ou de nobreza compatível (Neutros) em relação a zona fina empobrecida ou em relação à própria matriz. Se esses precipitados forem anódicos, serão preferencialmente corroídos, ao mesmo tempo que o restante do material torna-se catódico (PANGLOSSIANO, 1993; GEMELLI, 2001).

Se a zona empobrecida em soluto for anódica em relação ao resto da superfície, os precipitados constituirão os cátodos da célula eletroquímica, favorecendo assim a corrosão da zona empobrecida (PANGLOSSIANO, 1993; GEMELLI, 2001).

Vários metais são susceptíveis a corrosão intergranular. O quadro 1 apresenta algum desses metais e os tipos de precipitados que são geralmente formados.

Quadro 1 – Relação das principais ligas metálicas não-ferrosas susceptíveis corrosão intergranular.

Liga metálica	Precipitados ou segregações mais comuns	Fina zona	Fase que corrói
Al-Cu	CuAl_2	Empobrecida em cobre	Zona empobrecida em cobre
Al-Mg	Al_3Mg_2	-	Precipitado Al_3Mg_2
Al-Mg-Si	Fases catódicas em contorno de grão	-	-
Al-Zn-Mg	MgZn_2	-	Precipitado MgZn_2
Al-Zn-Mg-Cu	CuAl_2	Empobrecida em cobre	Zona empobrecida em cobre
Cu-Zn	-	Enriquecida em Zn	Zona enriquecida em zinco sofre dezincificação.
Ni-Fe-Cr	Carbonetos ricos em Cr	Empobrecida em Cr	Zona empobrecida em cromo
Ni-Cr-Mo	Fases ricas em Mo e Cr	Empobrecida em Mo e Cr	Dependo do meio os constituintes presentes no contorno ou a zona empobrecida podem corroer.

Fonte: adaptado Panossian (1993, p.135).

2.4.2.1 Corrosão Intergranular em ligas alumínio-cobre

O alumínio sofre corrosão intergranular em razão da formação de uma zona empobrecida em cobre por toda extensão dos contornos de grão, como decorrência da precipitação, nesse local, de CuAl_2 . Átomos de cobre dessa região, que se encontravam em solução sólida no alumínio, alastram-se para os contornos de grão. A formação dessa zona empobrecida de cobre denomina-se sensitização por tornar o material sensível a corrosão intergranular (GEMELLI, 2001).

Conforme Gemelli (2001) na liga alumínio-cobre, o cobre tem uma máxima solubilidade de 5% na temperatura de 550°C , em solução sólida a solubilidade do cobre diminui drasticamente com a temperatura, assim, ocorre a precipitação do cobre. Nos contornos de grão a difusividade do cobre é maior do que no interior, portanto, a precipitação se manifesta nos contornos.

Os precipitados formados são ricos em cobre, logo a matriz torna-se empobrecida em cobre nas vizinhanças. Nas regiões empobrecidas em cobre uma queda de potencial de pite na liga é induzida. Esse potencial começa a diminuir com o início da precipitação no interior do grão e alcança seu valor mínimo imediatamente após o endurecimento máximo da liga alumínio-cobre; já nos

contornos de grão esse processo ocorre de maneira bem mais rápida. Essa diferença na velocidade de precipitação faz com que o potencial de pite nos contornos de grão expresse uma queda relevante; já no seu interior do grão esse potencial praticamente não diminui (GEMELLI, 2001).

2.5 Revestimentos

As ações protetoras dos revestimentos anticorrosivos podem ser elucidadas graças a formação de películas de óxidos, hidróxidos e outros compostos pela reação de metais como alumínio, cromo, níquel e zinco com os oxidantes do meio corrosivo (PANNONI, 2007).

Os metais também podem ser usados como revestimentos, sendo os mais apropriados os que apresentam valores elevados de sobretensão ou sobrevoltagem, logo, mais resistentes ao ataque dos ácidos em meios não aerados como, por exemplo, o estanho, chumbo, zinco e cádmio (PANNONI, 2007).

O custo deste tratamento é alto, pois requer exigências especiais no preparo e limpeza da superfície.

Os revestimentos não metálicos inorgânicos, formado de compostos inorgânicos, são depositados diretamente na superfície metálica ou formados sobre essa superfície. Os compostos inorgânicos mais usados na proteção contra corrosão são os esmaltes vitrosos, vidros, porcelanas, cimentos, óxidos, carbetos, nitretos, boretos e silicetos.

Os principais requisitos que um revestimento deve ter são a baixa permeabilidade, uma boa resistência química ao meio agressivo, dilatação térmica compatível com o substrato, propriedades físicas adequadas aos abusos que receberá por abrasão, tráfego, impacto, flexão, etc. Suas principais características são: monolítico (sem emendas), remota ocorrência de trincas ou fissuras, não permite infiltrações, fácil e rápida aplicação e baixo custo (PANNONI, 2007).

2.5.1 Silanos

Silanos são compostos híbridos orgânico inorgânicos, empregados para melhorar a aderência nas mais diversas aplicações. Os silanos são normalmente empregados como agentes de acoplamento em materiais compósitos de matriz

poliméricas, melhorando assim, a adesão entre os constituintes (BOSSARDI et al, 2007).

A utilização de agentes de acoplamento em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de vidro, promove uma melhora significativa no módulo elástico e na resistência mecânica. Nos dias atuais, as fibras de vidro comerciais já vem infiltradas em silano, que agem ligando o reforço através de grupos hidroxilas presentes na superfície, formando assim, uma ponte com a matriz polimérica (BOSSARDI et al,2007).

De acordo com Oliveira (2006) os silanos também promovem a proteção contra a corrosão em substratos.

Dentre as vantagens que se pode destacar para o uso dos silanos em substituição a tratamentos como a fosfatização e a cromatização é o fato de não serem agressivos ao meio ambiente, de proporcionar proteção contra corrosão mesmo sem a utilização de tintas, podendo até serem mais eficientes que os tratamentos mencionados acima e ainda possuir uma versatilidade de aplicação (BOSSARDI et al, 2007).

Bossardi et al (2007) cita que silanos são compostos orgânicos a base de silício e, quando aplicados em condições adequadas promovem a polimerização de um filme homogêneo na superfície apresentando ótimas propriedades de aderência.

O filme de silano pode ser obtido tanto por imersão do metal numa solução de silanos, ou por aplicação simples com pincel. A forma mais comum é por imersão, pois forma um filme mais homogêneo.

Uma camada de silano considerada ótima para a finalidade de proteção deve ter espessura entre 50nm e 100nm e deverá ter ligações covalentes com o óxido do metal através de ligações metalo-siloxanos, hidrolicamente estáveis do tipo Me-O-Si (OLIVEIRA, 2006).

Filmes muito finos tendem a desperdiçar materiais e podem perder desempenho, porque são mecanicamente mais frágeis e quebradiços que filmes mais espessos (OLIVEIRA, 2006).

3 METODOLOGIA

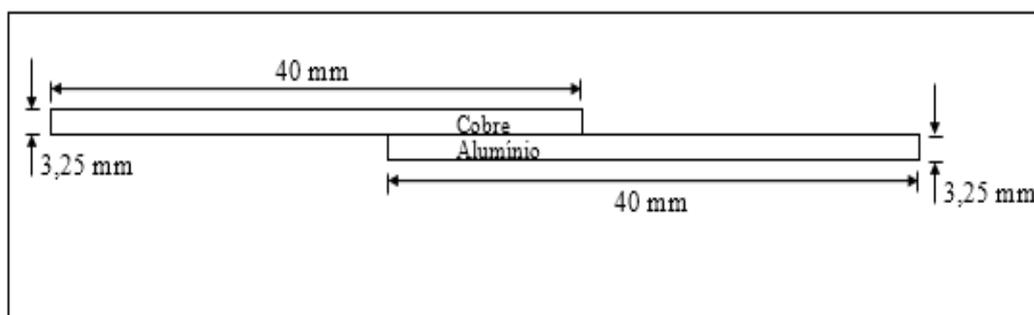
A metodologia a ser empregada para a execução desta pesquisa é fundamentalmente experimental, consistindo de três etapas principais: a primeira etapa consiste na aquisição das amostras previamente soldadas à fricção FSW, a segunda etapa compreende na caracterização eletroquímica dos materiais através de ensaios. O detalhamento dos ensaios é descrito na sequência do capítulo.

De forma a satisfazer com os objetivos mencionados no Capítulo 1 deste trabalho, serão realizados ensaios de laboratório. O programa experimental irá ser composto por ensaios de impedância, curvas de polarização e microscopia eletrônica de varredura.

3.1 Materiais

As amostras produzidas consistiram em juntas previamente soldadas sobrepostas de alumínio e cobre, nas dimensões ilustradas na Figura 6. Utilizou-se, em todas as amostras, a chapa de cobre logo acima do alumínio. O comprimento total de soldagem foi de 20 mm.

Figura 6 - Dimensões das juntas soldadas.



Fonte: Próprio autor.

Os materiais que serão utilizados para a análise em laboratório são o alumínio ASTM AA 6060 T5 fornecido em barras retangulares de 19,05*3,13 mm e o cobre ASTM B-187 C110-TÊMPERA 1/2 DURO na forma de barras de dimensões nominais iguais às da liga de alumínio fornecidos pela empresa Irmãos Galeazi Sul Ltda., situada na rua João Brufatto, no bairro Navegantes, Porto Alegre, RS.

A fim de tentar mitigar a corrosão, utilizou-se como revestimento o Silano, fornecido cordialmente pela Universidade Federal do Rio grande do Sul.

As Tabelas 1 e 2 ilustram respectivamente as propriedades mecânicas e a composição química do alumínio, já as Tabelas 3 e 4 referem-se ao cobre, segundo certificado fornecido pelo fabricante.

Tabela 1: Propriedades mecânicas da liga de alumínio.

Limites de resistência. (MPa)		Limite de escoamento		Alongamento(%)		Dureza Brinell(HB)		Condut. Elétrica	
Min	Máx.	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
150	-	110	-	8	-	66	-	-	-

Fonte: Irmãos Galeazi Sul Ltda.

Tabela 2: Composição Química da liga de alumínio.

	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	B	Be	Cr	Bi	Pb	Ga	V	Na	Zr	Outros
Min	-	1,0	0,35	-	-	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Max	0,1	0,3	0,60	0,10	-	0,30	0,1	0,1	-	-	0,05	-	-	-	-	-	-	0,150

Fonte: Fonte: Irmãos Galeazi Sul Ltda.

Tabela 3: Propriedades mecânicas da liga de cobre.

Limites de resistência. (MPa)		Limite de escoamento		Alongamento(%)		Dureza Brinell(HB)		Condut. Elétrica	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
280	320	270	340	6	12	90	105	99	-

Fonte: Fonte: Irmãos Galeazi Sul Ltda.

Tabela 4: Composição química da liga de cobre.

	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	B	Be	Cr	Bi	Pb	Ga	V	Na	Zr	Outros
Min	99,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Max	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

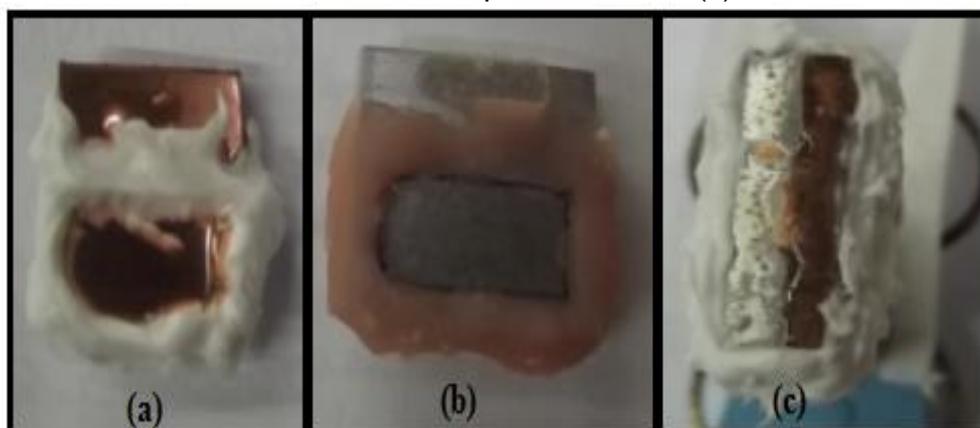
Fonte: Fonte: Irmãos Galeazi Sul Ltda.

3.2 Preparação das Amostras

As amostras de liga de alumínio AA ASTM 6060-T5, de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO e da junta soldada FSW AA ASTM 6060-T5, de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO ilustradas pela Figura 7(a), (b) e (c) respectivamente, foram desengorduradas usando-se uma mistura (1:1 v/v) de álcool etílico e água.

A superfície foi preparada por moagem com papel de carbonato de silício até o grau de 2000, seguido por uma lavagem com água destilada, usado banho de ultrassom, e, por fim, uma secagem sob uma corrente de ar quente.

Figura 7: Amostras de liga de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO (a), alumínio AA ASTM 6060-T5 (b) e da junta soldada FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre B-187 C110-Têmpera ½ DURO (c) utilizadas.



Fonte: Próprio autor

O revestimento de Silano (3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano) foi dissolvido (4% v/v) numa mistura de etanol (50% v/v) e água desionizada (46% v/v). A mistura foi agitada durante uma hora a temperatura ambiente. A solução foi mantida durante 3 dias antes de fazer a deposição sobre os substratos. Todos os substratos permaneceram imersos durante 15 minutos em solução de Silano, seguido de cura a 90° C por 1 hora.

3.3 Ensaios de Corrosão

3.3.1 Impedância

De acordo com Wolynech (2003) o método também é conhecido como método de impedância eletroquímica ou método de impedância AC, tendo sido sugerido por Mansfeld em 1988 o nome de eletroscopia de impedância eletroquímica.

As vantagens do método de impedância eletroquímica em relação à técnica de corrente contínua são diversas, evidenciando-se as seguintes:

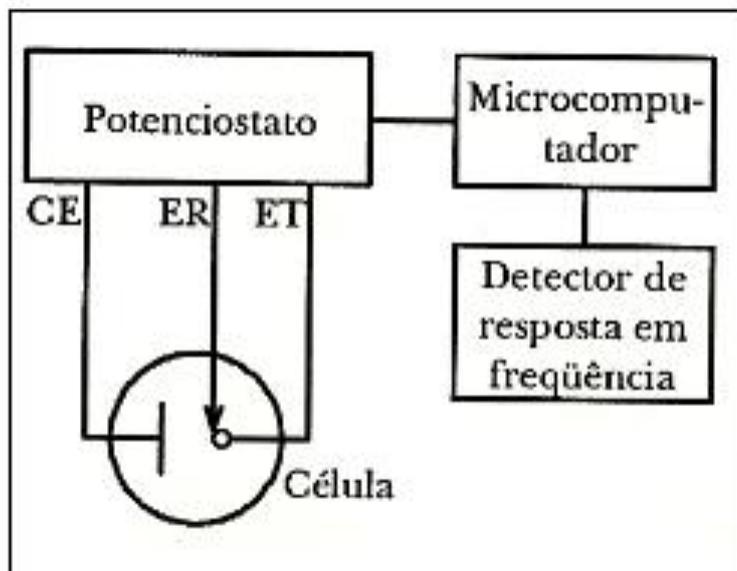
- utilização de sinais muito pequenos que não desestabilizarão as propriedades do eletrodo;
- medir taxas de corrosão em meios de baixa condutividade e a oportunidade de estudar reações de corrosão;
- a resistência de polarização e a capacitância da dupla camada podem ser definidas numa mesma medida;

Uma das limitações do método é a determinação somente da resistência de polarização (RAMANATHAN, 1998).

3.3.1.1 Medida da Impedância AC em Sistemas Eletroquímicos

Segundo Wolynech (2003) as medidas de impedância AC em sistemas eletroquímicos podem ser realizadas segundo o arranjo experimental ilustrado pela Figura 8.

Figura 8 – Arranjo Experimental Típico para a Realização das Medidas de Impedância AC em Sistemas Eletroquímicos.



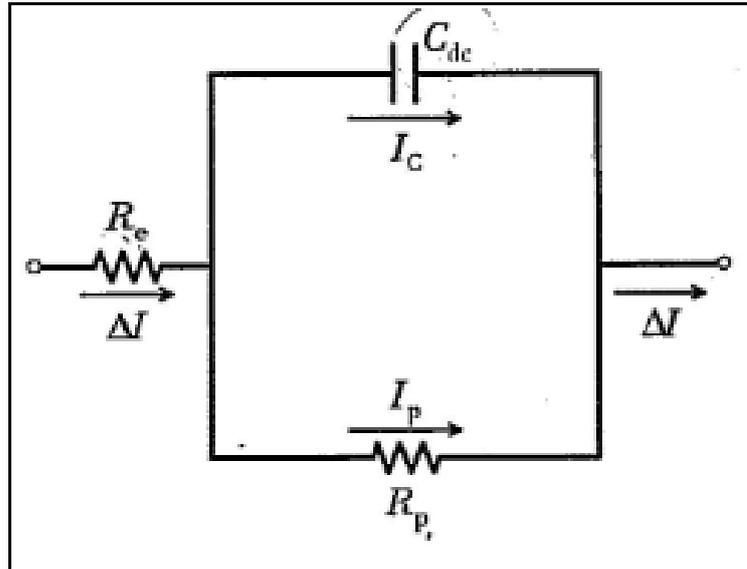
Fonte: Wolyneq (2003, p.117).

Observa-se que a aplicação de corrente alternada à célula eletroquímica é feita por meio de um potenciostato. Com uma frequência determinada, a corrente alternada é programada pelo microcomputador e empregada no eletrodo de trabalho pelo detector de resposta em frequência que conduz os dados do microcomputador para o processamento (BETANECOL, 2003).

3.3.1.2 Análise dos Resultados de Impedância eletroquímica

A área de interação do metal eletroquímico de um eletrodo pode ser representado por um circuito elétrico análogo como ilustrado pela Figura 9.

Figura 9 – circuito elétrico equivalente de uma interface metal eletrólito.



Fonte: Wolyneec (2003, p.118).

É possível mostrar que a impedância Z do circuito da Figura 9 é expressada pela Equação 5:

$$Z = Z_r + jZ_i = R_e + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C_{dc}} \quad (5)$$

A Equação 4 pode ser reescrita como mostrado na Equação 6:

$$Z = R_e + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_{dc}^2} - \frac{j\omega R_p^2 C_{dc}}{1 + \omega^2 R_p^2 C_{dc}^2} \quad (6)$$

Sendo que:

Z_r = parte real do número complexo Z ;

Z_i = parte imaginária do número complexo Z ;

Eliminando ω resulta na Equação 7:

$$[Z_r - (R_e + \frac{1}{2} R_p)]^2 + Z_i^2 = (R_p/2)^2 \quad (7)$$

A Equação 6 é a equação de um círculo de raio $\frac{1}{2} R_p$, de modo que o centro está no eixo Z_r em $Z_r^\circ = R_e + \frac{1}{2}R_p$.

O presente trabalho fez uso de um potenciostato AUTOLAB PGSTAT 30 acoplado a um analisador de resposta de frequência FRA 2 e um sistema PAR de rotação analítica.

Utilizou-se um arranjo de pilhas eletroquímicas, composto de três elétrons, o eletrodo de trabalho (alumínio 6060-T5, cobre ASTM-B-110 ou junta soldada FSW alumínio 6060-T5/cobre ASTM-B-110) com 1 cm² de área exposta. Como eletrodo de referência utilizou-se o Calomelano saturado e como contra eletrodo a platina.

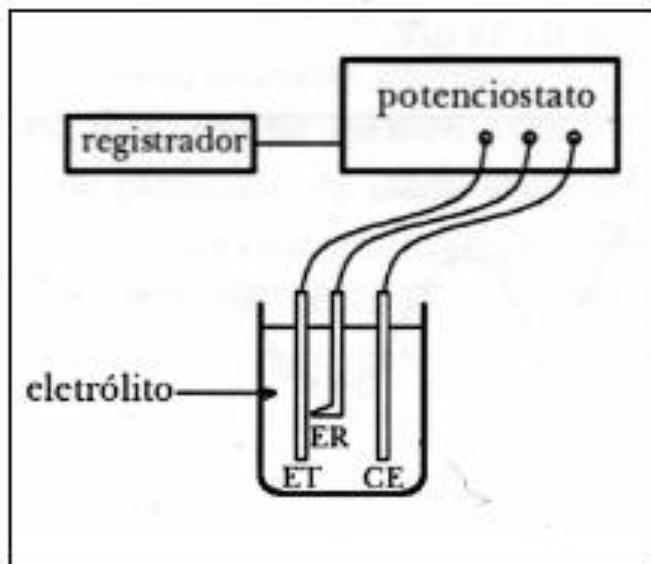
As medições foram realizadas no modo potenciostático no potencial de circuito aberto (OCP).

3.3.2 Curvas de Polarização

Para impor experimentalmente a um eletrodo um potencial de eletrodo diferente do de corrosão é preciso lançar mão de fontes externas de potencial. Um controle correto do potencial de eletrodo é conseguido pelo potenciostato, através do qual é possível, além de impor ao eletrodo do potencial desejado com relação ao eletrodo de referência, também mensura a corrente de polarização e, inclusive, registrá-la em função do potencial por meio de um registrador. Pode-se, desta forma, obter as curvas de polarização experimentais, que demonstram a relação entre o potencial de eletrodo aplicado e a correspondente corrente mensurada no potenciostato (BETANECOL, 2003)

A Figura 10 ilustra esquematicamente um arranjo para o levantamento dessas curvas de polarização por intermédio de um potenciostato.

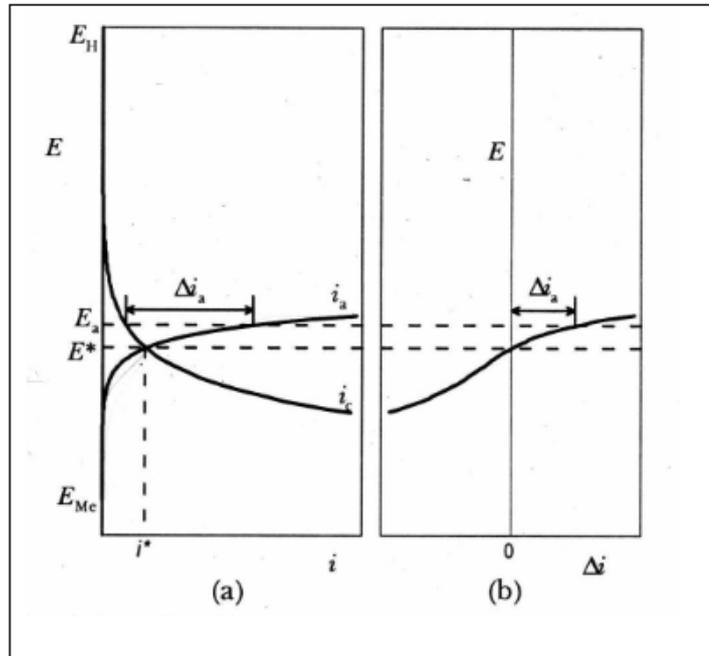
Figura 10 – Arranjo esquemático para levantamento de curvas de polarização. ET = eletrodo de trabalho; ER = eletrodo de referência; CE = contra-eleto-rodo.



Fonte: Wolyneec (2003, p.80).

Na Figura 10 o eletrodo de referência situa-se dentro de um capilar de Luggin, cuja extremidade capilar é mantida o mais próximo possível da superfície do eletrodo de trabalho, em torno de 1 a 2 mm. Isto é importante pois, como durante o levantamento das curvas de polarização se tem um fluxo de corrente entre o eletrodo de trabalho e o contra-eleto-rodo, se estabelece um gradiente de potencial entre ambos, e o valor do potencial do eletrodo passa a ser afetado pela posição da extremidade do capilar. A polarização de um eletrodo por meio de um potenciostato conduz ao levantamento de uma curva de polarização que não é mais representativa da polarização de uma única reação, mas, sim, do efeito global de todas as reações que ocorrem conjuntamente sobre o eletrodo. A Figura 11 ilustra um caso dos mais simples em que sucede corrosão de um metal à custa da redução de hidrogênio (WOLYNEEC, 2003).

Figura 11 – curva de polarização (b) obtida num potenciostato para um caso de corrosão simples (a).



Fonte: Wolyneec (2003, p.81).

Para Wolyneec (2003) quando o potencial de corrosão E^* for igual ao potencial aplicado pelo potenciostato, nenhuma corrente será constatada pelo aparelho, uma vez que neste potencial a corrente anódica i_a é anulada pela corrente catódica i_c e, diante disso, o potenciostato assinala a diferença como mostra a Equação 8.

$$\Delta i_a = i_a - |i_c| > 0 \quad (8)$$

De forma equivalente, para um potencial E_c menor que E^* , i_c excede em magnitude o valor de i_a e, diante disso, o potenciostato sempre assinala a diferença como mostra a equação 9 (WOLYNEC, 2003):

$$\Delta i_c = i_a - |i_c| > 0 \quad (9)$$

Compreendendo esse procedimento a uma faixa de potenciais resulta num gráfico E vs. Δi , uma curva como mostrada em (b) na Figura 12. Constata-se assim, que o potenciostato indica a curva diferença entre as curvas de polarização das duas reações envolvidas.

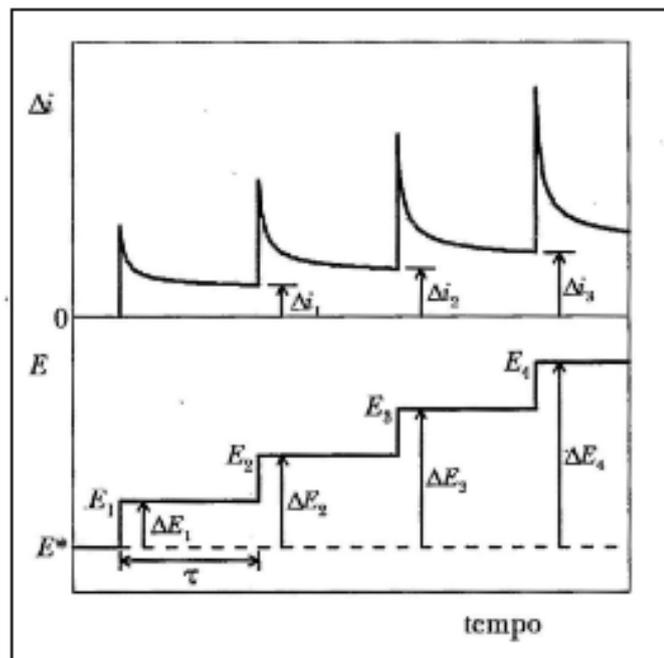
3.3.2.1 Levantamento das Curvas de Polarização Experimentais

Conforme Wolyneć (2003) para se alcançar uma curva de polarização experimental pode-se usar um dos seguintes métodos convencionais.

- método potencioestático;
- método potenciodinâmico;

No método potencioestático empregam-se valores diferentes, crescentes ou decrescentes ao potencial de eletrodo E e, para cada potencial, define-se o correspondente valor de Δi , conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Representação esquemática do método potencioestático para levantamento de uma curva de polarização experimental anódica a partir do potencial de corrosão E^* .

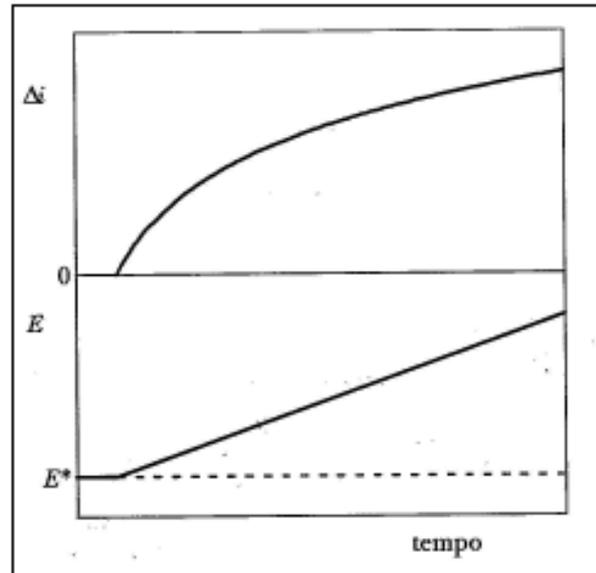


Fonte: Wolyneć (2003, p.84).

A Figura 12 ilustra o levantamento de uma curva de polarização experimental anódica a partir do potencial de corrosão E^* , a corrente Δi sofre um aumento repentino, ao se levar, por intermédio do potencioestato, o potencial ao valor E_1 . Posteriormente, é escolhido arbitrariamente um tempo t , o potencial é conduzido ao valor de E_2 , e a corrente Δi volta a sofrer o aumento brusco seguido de uma queda. O processo é repetido até se alcançar o potencial desejado. Já no método potencial

dinâmico, o potencial de eletrodo E , é variado constantemente e registra-se a variação de Δi , que também varia de forma constante, como é ilustrado na Figura 13 (OLINEÁCEO, 2003).

Figura 13 – Representação Esquemática do Método Esquemático Potencial dinâmico para Levantamento de Uma Curva de Polarização Experimental Anódica a partir do Potencial de Corrosão E^* .



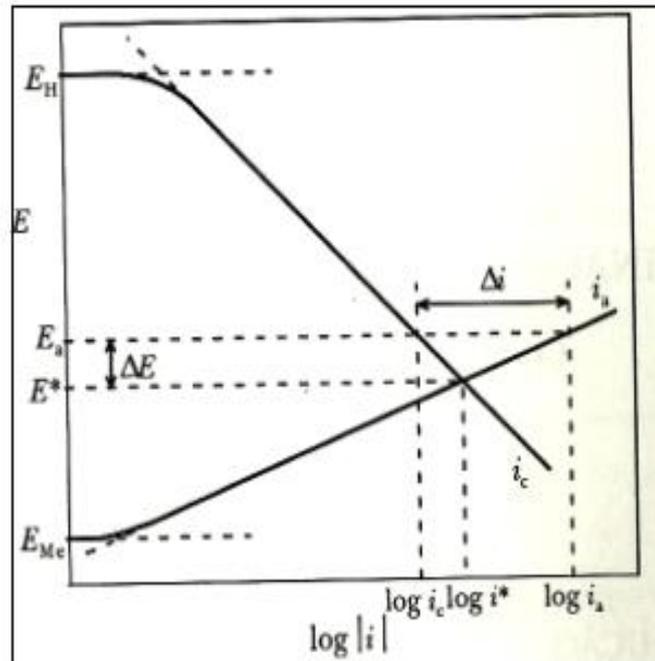
Fonte: Woly nec (2003, p.86)

O declive da reta denota a variação do potencial de eletrodo com o tempo, representando a velocidade de varrimento, que pode ser expressada em mV/min. Este varrimento de potencial é munido por uma unidade específica já incluída no potenciostato ou então por uma unidade separada que se liga ao potenciostato. É possível programar a velocidade de varrimento dentro de uma faixa de valores, que pode ir, por exemplo, de 1 mV/min até mais de 200 mV/min (WOLYNEC, 2003).

3.3.2.2 Curvas de Tafel

Para um sistema genérico de corrosão, a curva de polarização experimental é do tipo ilustrada na Figura 11 (b), a representação num gráfico E vs. $\log i$ das curvas de polarização das reações anódica e catódica que deram origem a essa curva como mostrado pela Figura 10 terá sua aparência ilustrada pela Figura 14.

Figura 14 – Ilustração esquemática de um Metal Me cujas Reações (Catódica e Anódica) são controladas pela polarização de ativação de Tafel. E^* = Potencial de corrosão; i^* = densidade de corrente de corrosão; E_{me} = Potencial do Equilíbrio do Eletrodo Me/Me⁺⁺; E_H = Potencial do Equilíbrio do Eletrodo H⁺/H₂.



Fonte: Wolyneec (2003, p.96)

Para Wolyneec (2003) os valores do potencial de corrosão E^* pode ser mensurados experimentalmente e, para um certo potencial E_a diferente de E^* , o valor da corrente Δi , que é a diferença entre a densidade de corrente anódica i_a e a densidade de corrente catódica i_c como mostra a Equação 10:

$$\Delta i = i_a - |i_c| \quad (10)$$

Se b_a e b_c forem declives de Tafel das retas de polarização das reações anódica e catódica na devida ordem, e se $\Delta E = E_a - E^*$, logo se pode escrever as Equações 11 e 12 (WOLYNEEC, 2003).

$$\Delta E = b_a \log \frac{i_a}{i^*} \quad (11)$$

$$\Delta E = -b_c \log \frac{i^*}{|i_c|} = b_c \log \frac{|i_c|}{i^*} \quad (12)$$

Das Equações 11 e 12 resulta-se as Equações 13 e 14 (WOLYNEC, 2003):

$$I_a = i^* \exp\left(\frac{2,303\Delta E}{b_a}\right) \quad (13)$$

$$|i_c| = i^* \exp\left(\frac{2,303\Delta E}{b_c}\right) \quad (14)$$

Substituindo as Equações 13 e 14 na Equação 10 se obtém a equação de Wagner-Traud (WOLYNEC, 2003).

$$\Delta i = i^* \left[\exp\left(\frac{2,303\Delta E}{b_a}\right) - \exp\left(\frac{2,303\Delta E}{b_c}\right) \right] \quad (15)$$

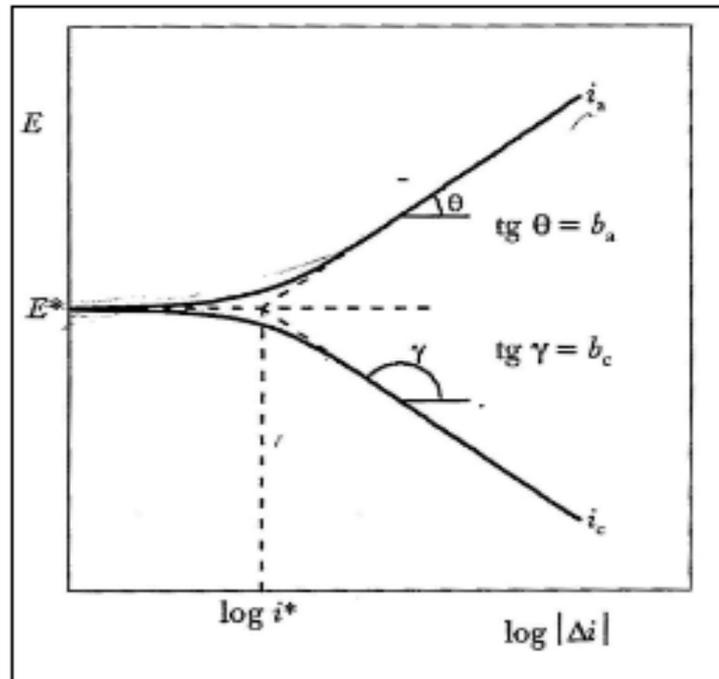
A equação de Wagner-Traud exhibe duas exponenciais cuja variação de valor com ΔE intercorre em sentido oposto. Desta maneira, para valores de $|\Delta E| \geq 30$ mV, uma das exponenciais se torna desprezível com relação à outra, resultando nas Equações 16 e 17 (WOLYNEC, 2003):

$$\Delta E_a = b_a \log \frac{\Delta i_a}{i^*} \quad (16)$$

$$\Delta E_c = b_c \log \frac{\Delta i_c}{i^*} \quad (17)$$

Assim a interpretação da equação de Wagner-Traud num gráfico de E vs. Log $|i_c|$ dirige a ilustração da Figura 14. Sendo E^* o potencial de corrosão, i^* a taxa de corrosão e Δi a densidade de corrente (WOLYNEC, 2003).

Figura 15 – Representação da Equação de Wagner-Traud num gráfico de E vs. Log $|\Delta i|$.



Fonte: Woly nec (2003, pg.84)

Constata-se, desta maneira, no gráfico da Figura 15 a extrapolação das retas de tafel para o potencial de corrosão E^* definindo o valor da taxa de corrosão i^* .

Segundo Woly nec (2003) uma das vantagens do método é precisar a taxa de corrosão e também, a partir das retas de Tafel, os parâmetros b_a e b_c , desta maneira se a inclinação da reta anódica for θ e da catódica γ , logo $b_a = \text{tg } \theta$ e $b_c = \text{tg } \gamma$.

Para que esse método possa ser utilizado, o conjunto de valores experimentais de $(E, \Delta i)$, quando plotado num gráfico E vs. $\text{Log } |\Delta i|$ indique pelo menos uma reta bem definida (WOLINEC, 2003).

O presente trabalho fez uso de um potenciostato AUTOLAB PGSTAT 30 acoplado a um analisador de resposta de frequência FRA 2 e um sistema PAR de rotação analítica.

Utilizou-se um arranjo de pilhas eletroquímicas, composto de três elétrons, o eletrodo de trabalho (alumínio AA ASTM 6060-T5, cobre ASTM-B-187 C-110-Têmpera ½ DURO ou junta soldada FSW DO TIPO alumínio AA ASTM 6060-T5/ cobre ASTM-B-187 C-110-Têmpera ½ DURO) com 1 cm^2 de área exposta. Como eletrodo de referência utilizou-se o Calomelano saturado e como contra eletrodo a platina.

As medições foram realizadas no modo potenciostático no potencial de circuito aberto (OCP).

O OCP, após a estabilização do potencial em torno de 12 min, definida nesse trabalho como potencial de corrosão (E_{corr}). A amplitude do sinal de perturbação foi de 10 mV, e a gama de frequências estudadas variaram de 105 a 02/10 Hz. Após uma hora de imersão, as polarizações lineares com taxas de varrimento de 0.02 mV/s foram registradas, variando de $-0,2 \text{ V} + E_{\text{corr}}$ a $0,2 + E_{\text{corr}}$. Foi utilizado a solução de NaCl, correspondente a concentração de sal de 0,05M, simulando assim um meio rigoroso.

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

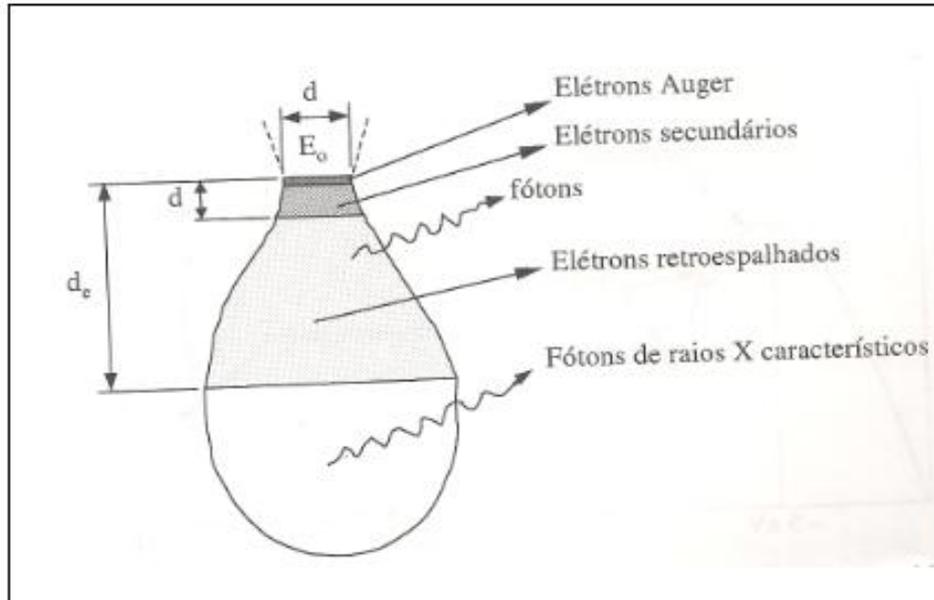
A observação dos corpos de prova ao microscópio eletrônico de varredura deve ser feita sobre a superfície externa da corrosão ou em seções transversais. Neste último, o corpo de prova corroído é embutido em resina de acrílico autopolimerizável e logo após é cortado e polido em uma das faces de corte. O embutimento antes do corte evita assim o descascamento da camada de corrosão (WOLYNEC, 2003).

Ao microscópio de varredura, a fonte de excitação é composto de um feixe de elétrons. Estes são obtidos de um filamento de tungstênio (2400 a 2600 °C) através da aplicação de alta voltagem. O feixe de elétrons é acelerado, guiado e controlado através de bobinas, lentes e diafragmas. A aceleração do feixe de elétrons depende muito da tensão que é aplicada. Na prática, geralmente é utilizado 15 ou 20 KeV (WOLYNEC, 2003).

O alvo excitado emite diferentes espectros. Tais espectros são procedentes do volume de interação partícula material chamado de “pêra” de emissão (devido a sua forma), cuja dimensão depende muito da intensidade e do diâmetro do feixe de elétrons que irão incidir, bem como da composição química do material irradiado (RMANATHAN, 1998).

A Figura 16 ilustra o volume de interação do feixe de elétrons incidentes, bem como da composição química do material irradiado.

Figura 16: Espectros emitidos pelo volume de interação entre os elétrons incidentes e o material.



Fonte: Gemelli (2001, p.161).

A interação dos elétrons incidentes com o alvo ocorre através de choques inelásticos e elásticos. Os elétrons que sofrem choques inelásticos tendem a perder energia e assim, absorvidos pelo volume de interação, enquanto os elétrons que sofrem choques elásticos praticamente não perdem energia e são jogados para fora da superfície do alvo. Esses últimos são chamados de elétrons retro difundidos ou retro espalhados (GEMELLI, 2001).

Quando um elétron choca-se inelasticamente com um átomo do alvo, ele excita os elétrons das camadas eletrônicas desse átomo. A ionização dos átomos do alvo é responsável pela emissão de elétrons conhecidos como Auger (homenagem ao seu descobridor) e elétrons secundários.

A técnica de microscopia eletrônica de varredura faz uso (detecta e analisa) os elétrons secundários e os elétrons retro espalhados que são emitidos. Eles são projetados sobre uma tela de televisão e reproduzem a imagem do alvo. As imagens com elétrons secundários exibem um contraste devido a topografia do corpo, graças a grande profundidade de campo do microscópio. Nas partes mais destacadas do material a energia de ionização é maior e, assim, maior é a quantidade de elétrons absorvidos pelo detector. Esses pontos aparecem mais claros sobre a tela da imagem, ao contrário dos pontos que são mais profundos. Com os elétrons retro espalhados, o sinal obtido mostra basicamente um contraste de composição

química, as fases aparecem mais, ou menos, claras de acordo com a média dos números atômicos dos elementos presentes. Quanto maior é o número atômico do elemento químico, maior é a energia elástica dos elétrons retro espalhados e, logo, mais intenso o sinal. Assim, quanto maior o número atômico médio de uma fase, mais clara é a imagem sobre a tela (GEMELLI, 2001).

Com esse tipo de imagem fica mais fácil observar a repartição ou distribuição das fases presentes. No caso da oxidação de metais com formação de óxidos de várias camadas, é possível notar as diferentes camadas de óxido. Semelhantemente, é possível observar eventuais precipitados na camada de corrosão. A observação em corte transversal é a única maneira de verificar se o material apresenta ou não corrosão interna (GEMELLI, 2001).

O referente trabalho fez uso de um microscópio de varrimento JSM 5800 da Shimadzu, a fim de analisar as microestruturas. A tensão de aceleração utilizada para a obtenção das imagens foi de 15 KeV. O equipamento estava acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva de raio x (EDS).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo deste trabalho. Os resultados, com suas respectivas discussões estão subdivididos em três subcapítulos: o primeiro subcapítulo apresenta uma caracterização eletroquímica por espectroscopia de impedância eletroquímica através de diagramas de Bode, o segundo subcapítulo as curvas de polarização anódica e catódica mediante as curvas de Tafel. O terceiro subcapítulo, apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análises composicionais por energia dispersiva de raios-X (EDS).

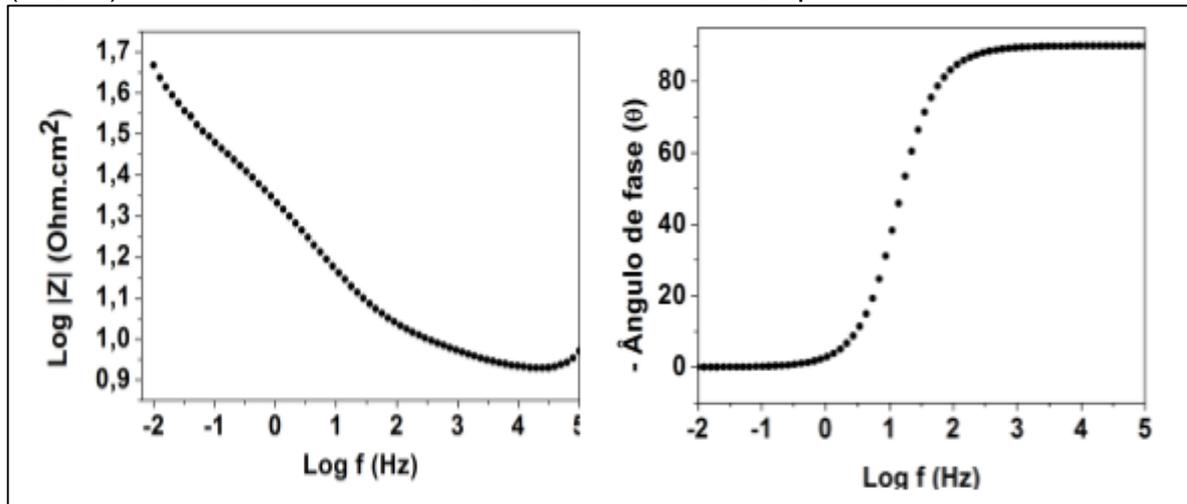
Todos os ensaios eletroquímicos foram realizados em triplicata consistindo em três corpos de prova: alumínio AA ASTM 6060-T5, cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO e da junta soldada FSW do tipo alumínio ASTM 6060-T5 /cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO.

4.1 Caracterização Eletroquímica

Neste capítulo serão apresentados a caracterização eletroquímica, mediante diagramas de bode para o alumínio AA ASTM 6060-T5, cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO, e junta soldada FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO, obtidas após 15 minutos de imersão em solução contendo $0,05 \text{ mol. L}^{-1}$ de NaCl, afim de simular um ambiente corrosivo.

Inicialmente o comportamento eletroquímico do cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO foi investigado. A Figura 17 ilustra o gráfico do ângulo de fase *versus* $\log f$ do cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO onde tem-se aproximadamente um ângulo de fase de 85° , indicando assim que o comportamento do sistema é do tipo capacitivo. Este comportamento está relacionado devido ao fato do óxido de cobre formar uma camada fina e compacta na superfície do metal, originando assim uma proteção ao material. A Figura 17 também mostra o gráfico do \log do módulo da impedância do cobre *versus* $\log f$. É observado na região das baixas frequências um valor de resistência em torno de $50,11 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

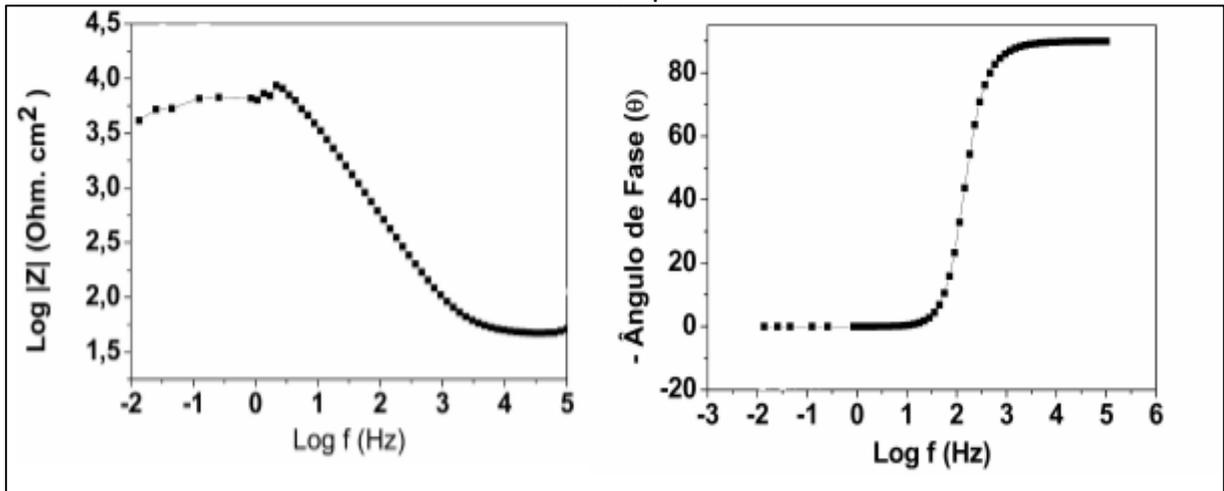
Figura 17: Diagrama de Bode do cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO (99,9%) do eletrodo imerso em 0,05 mol. L⁻¹ de NaCl, após 15 minutos de imersão.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 18 ilustra o gráfico do ângulo de fase *versus* log f do alumínio AA ASTM 6060-T5 onde tem-se aproximadamente um ângulo de fase de 86°, indicando assim que o comportamento do sistema é do tipo capacitivo. Este comportamento está relacionado devido ao fato de o óxido de alumínio formar uma camada fina e compacta na superfície do material, originando assim também uma proteção ao material. A Figura 18 também apresenta um valor de resistência em torno de 3981,07 Ω.Cm² na região das baixas frequências no gráfico do log do módulo da impedância do alumínio *versus* log da frequência.

Figura 18: Diagrama de Bode de alumínio AA ASTM 6060-T5 (99,9%) do eletrodo imerso em 0.05mol.L^{-1} de NaCl, após 15 minutos de imersão.

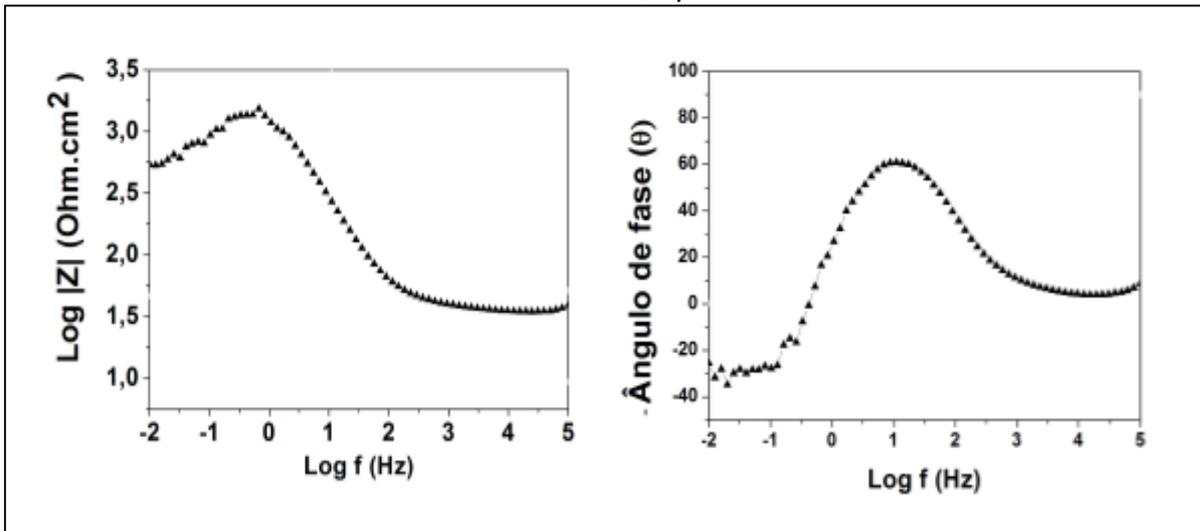


Fonte: Próprio autor.

A Figura 19 demonstra o gráfico do ângulo de fase vs log f da junta soldada FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera $\frac{1}{2}$ DURO onde tem-se aproximadamente um ângulo de fase de 60° , o que está relacionado a processos difusionais na superfície do material bem como um forte comportamento indutivo com ângulos de fase negativos na região das baixas frequências indicando intensos processos corrosivos.

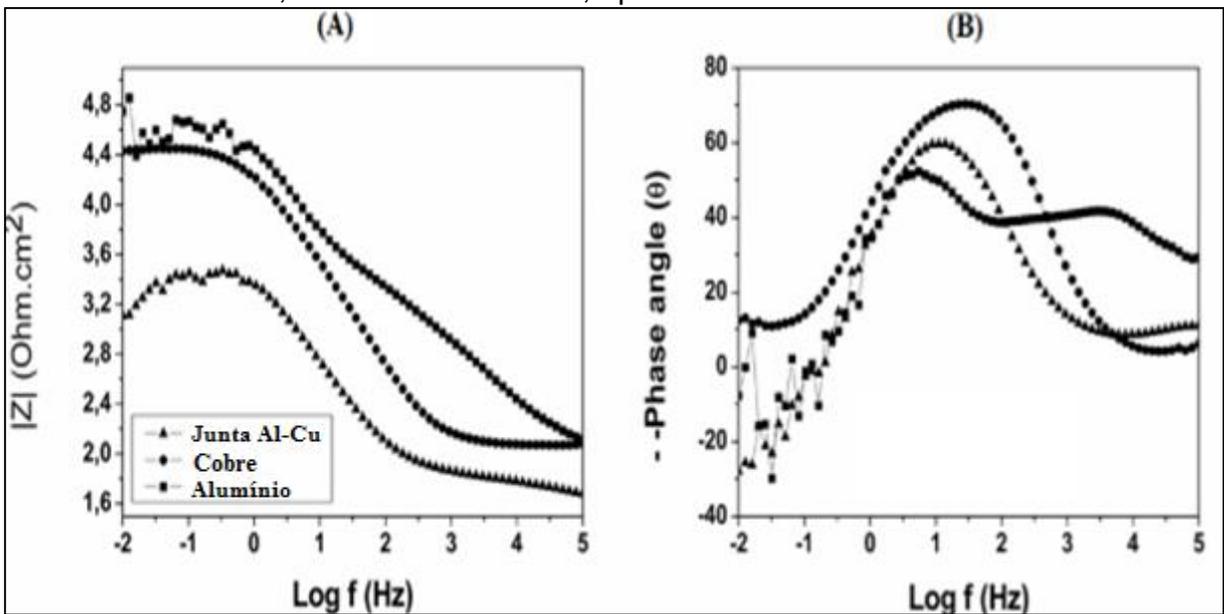
A Figura 19 também mostra o gráfico do log do módulo da impedância da junta soldada FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera $\frac{1}{2}$ DURO *versus* log da frequência. É observado na região das baixas frequências um valor de resistência em torno de $7943,28 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Figura 19: Diagrama de Bode de eletrodos da solda conjunta FSW do tipo alumínio-cobre imerso em 0.05mol.L^{-1} NaCl, após 15 minutos de imersão.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20: Diagrama de Bode do cobre (99,9%), alumínio (99,9%) e junta soldada FSW do tipo alumínio-cobre tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano e imerso em $0,05\text{ mol. .L}^{-1}$ de NaCl, após 15 minutos de imersão.



Fonte: Próprio autor

A Figura 20 evidencia o diagrama de Bode conjunto do cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera $\frac{1}{2}$ DURO, alumínio AA ASTM 6060-T5 e da junta soldada FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera $\frac{1}{2}$ DURO tratadas com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-Silano. Todos os espectros de impedância

obtidos durante o período de imersão para as amostras com o revestimento apresentam melhorias na proteção contra a corrosão quando comparadas com as amostras sem o revestimento (Figuras 17, 18 e 19).

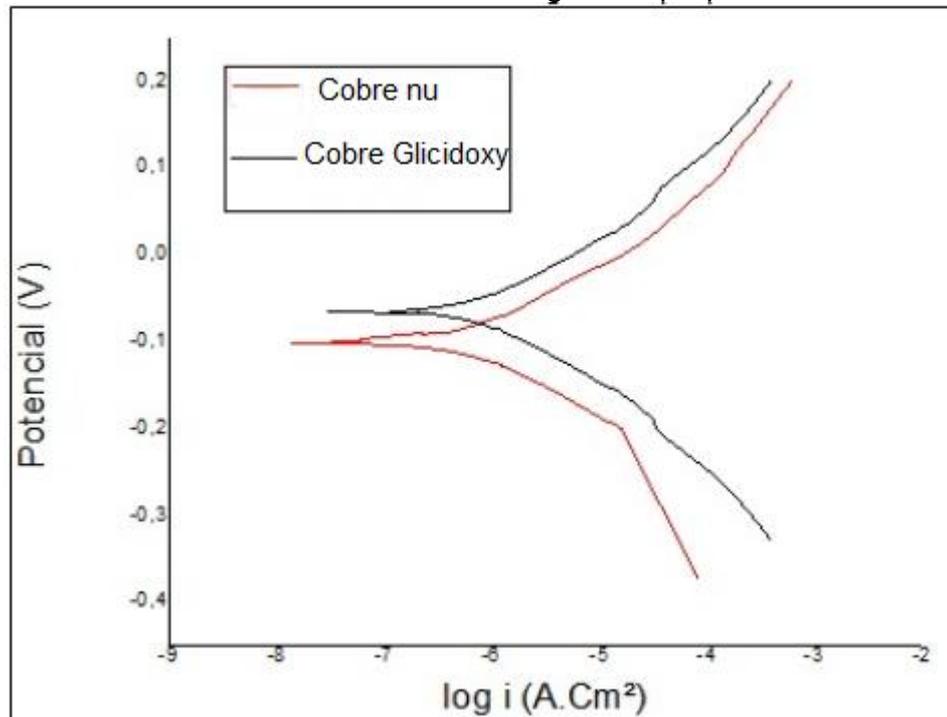
O tratamento à base de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano atua como uma camada de barreira aumentando a resistência à corrosão e minimizando os processos deletérios na superfície do metal.

4.2 Medidas de Polarização

As amostras de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO, alumínio AA ASTM 6060-T5 e da junta soldada FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre A ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO não tratadas, foram imersas durante um tempo de 15 minutos em 0,05 mol. L⁻¹ de NaCl, afim de simular um ambiente agressivo.

As Figuras 21, 22 e 23, mostram um estudo comparativo entre as amostras sem o tratamento e com o tratamento à base de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.

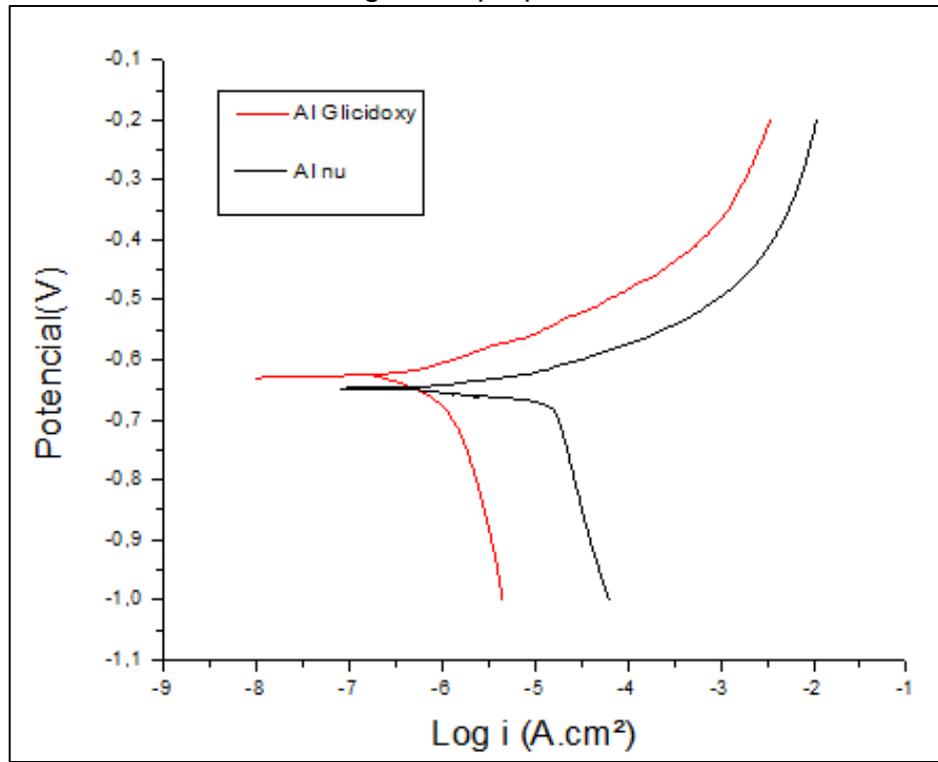
Figura 21: Polarização da liga de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO sem tratamento e com o revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.



Fonte: Próprio autor

Com base na Figura 21, pode-se observar um sutil aumento no valor do potencial de corrosão (E_{corr}) para o cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO com tratamento (-0,060 V) em relação ao cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO sem tratamento (-0,100 V), e uma diminuição na densidade de corrente (i_{corr}) de 1×10^{-3} A para 1×10^{-4} A, respectivamente.

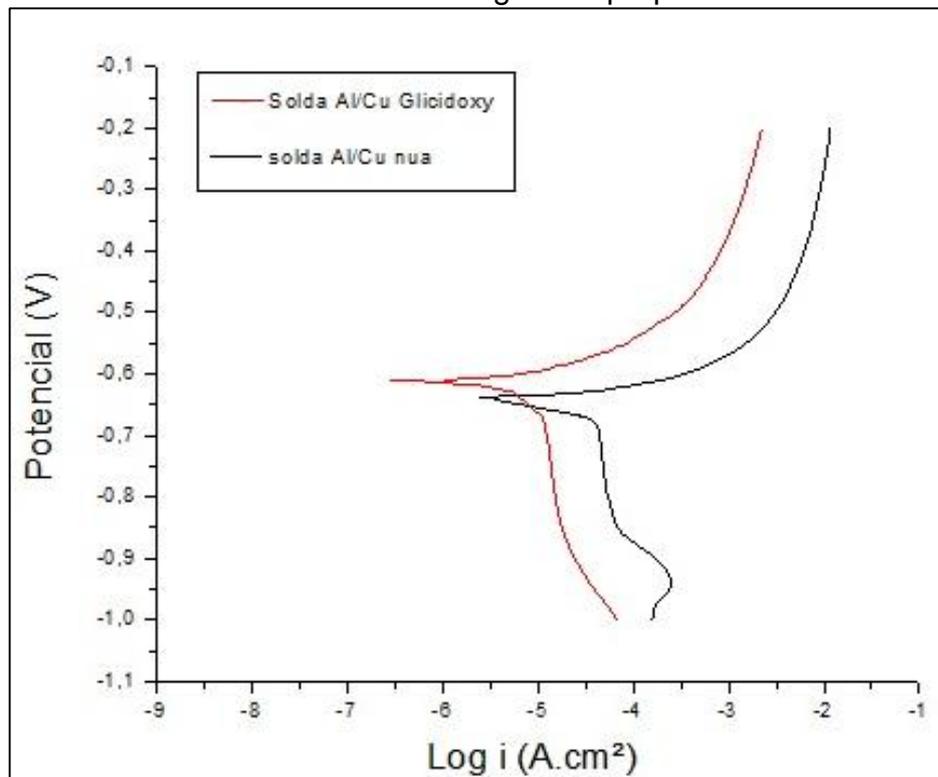
Figura 22: Polarização da liga de alumínio AA ASTM 6060-T5 sem tratamento e com o revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.



Fonte: Próprio Autor.

Analisando a Figura 22, podemos observar um deslocamento para valores mais positivos no potencial de corrosão (E_{corr}) do alumínio AA ASTM 6060-T5 sem tratamento (-0,650 V) para o alumínio AA ASTM 6060-T5 com tratamento (-0,610 V), e um decréscimo na densidade de corrente (i_{corr}) de aproximadamente de $7,9 \times 10^{-5}$ A, alumínio sem tratamento, para $3,16 \times 10^{-6}$ A, alumínio tratado com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.

Figura 23: Polarização da junta soldada FSW do tipo Alumínio-Cobre sem tratamento e com o revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.



Fonte: Próprio Autor.

Pode-se perceber analisando a Figura 23 um potencial de corrosão (E_{corr}) para a amostra da junta soldada FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO sem tratamento em torno de -0,660V e uma densidade de corrente (i_{corr}) de aproximadamente de $1,58 \times 10^{-4}$ A. Enquanto que para junta soldada FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO o alumínio AA ASTM 6060-T5 revestido com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano encontra-se um potencial de corrosão (E_{corr}) deslocado para valores mais positivos (-0,600 V) e uma densidade de corrente (i_{corr}) menor ($6,3 \times 10^{-5}$ A).

É possível observar através das Figuras 22 e 23, uma mudança no potencial deslocada para valores mais positivo no E_{corr} e um decréscimo acentuado da densidade de corrente (i_{corr}) em todas as amostras quando essas foram revestidas com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano. A Figura 21 evidencia que o tratamento a base de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano não se adere tão eficientemente sobre a superfície do cobre do que sobre a superfície do alumínio, uma vez que as ligações

metaxalona são mais eficazes sobre a superfície de óxido de alumínio que recobre o alumínio do que sobre a superfície de óxido de cobre que recobre o cobre.

Os potenciais (V) mais negativos indicam uma maior tendência à corrosão, no entanto, os valores de densidade de corrente limite $\log i$ (A. cm^2) são os que determinam as velocidades de corrosão (OLIVEIRA, 2006).

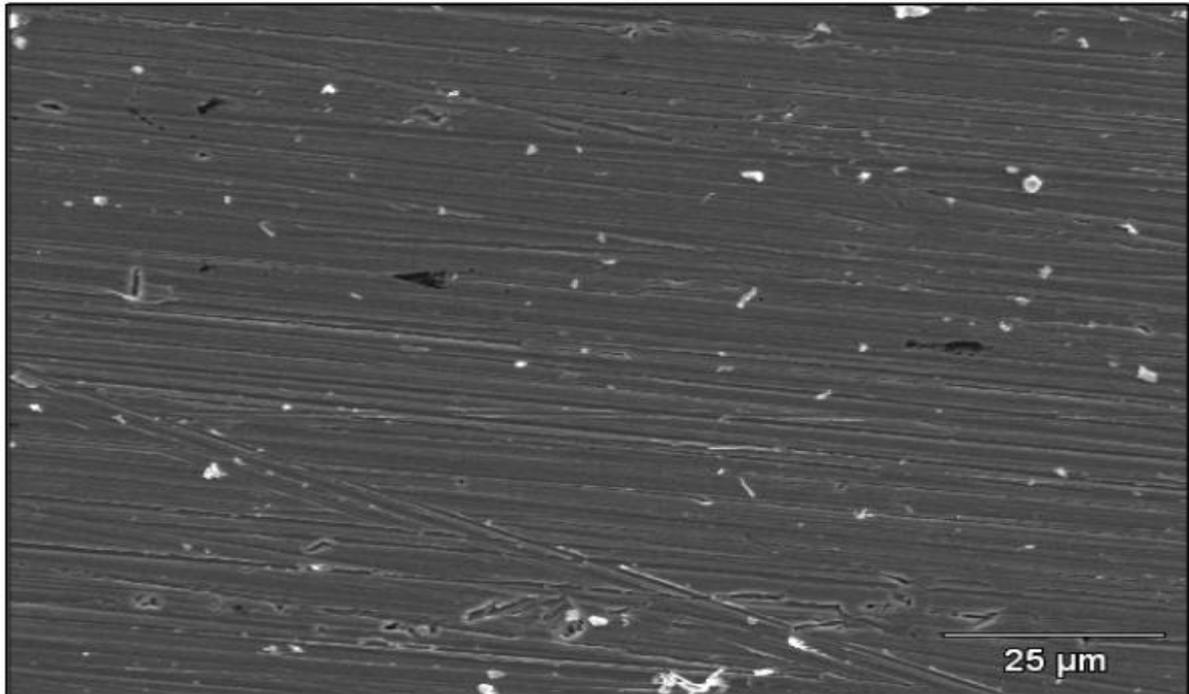
Nesse contexto, comparando as juntas soldadas FSW do tipo alumínio AA ASTM 6060-T5/cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO sem o tratamento e com o tratamento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano, a junta soldada com o revestimento tem uma cinética de corrosão menos favorecida.

Os valores das densidades de corrente limite também conduzem a mesma conclusão.

4.3 Caracterização Por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Análises de microscopia eletrônica por varredura (MEV) foram feitas com o objetivo de averiguar o eficiente recobrimento do tratamento a base de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano sobre as superfícies metálicas. Seguem as figuras 24 a 29 obtidas e suas respectivas discussões.

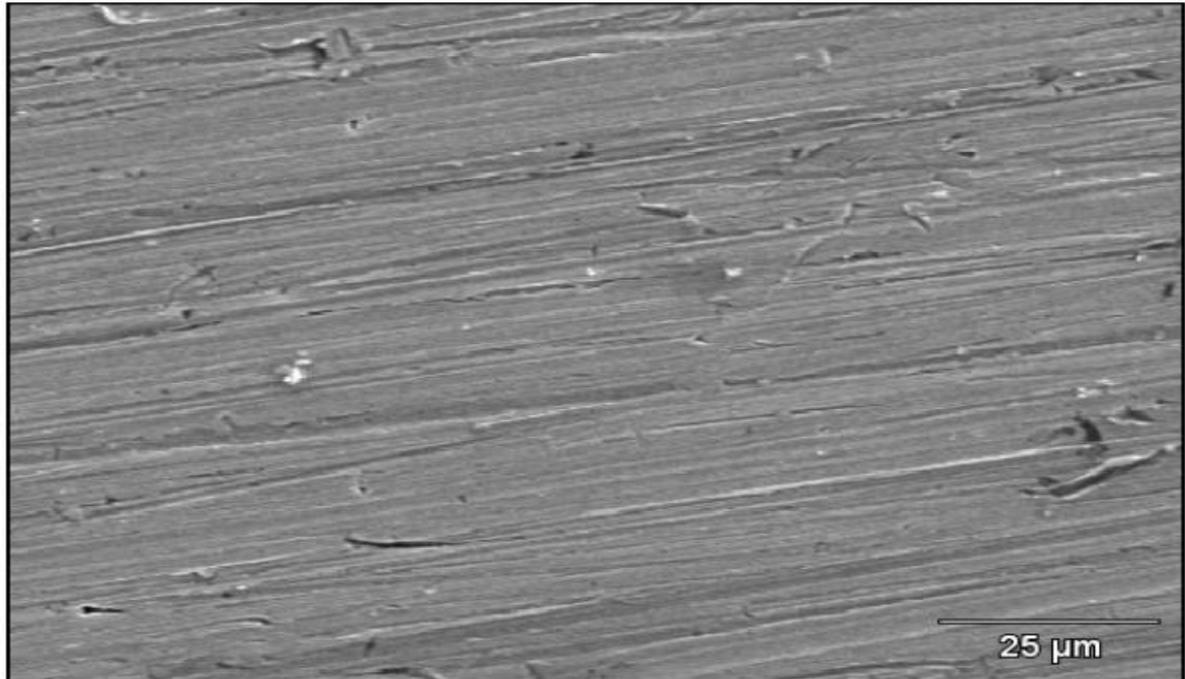
Figura 24: Microscopia por MEV da liga de alumínio AA ASTM 6060-T5 não tratada com magnificação de 3000x.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 24, pode-se observar a presença de grande quantidade de precipitados, provavelmente ricos em magnésio (pontos mais claros), constituinte da liga alumínio AA ASTM 6060-T5.

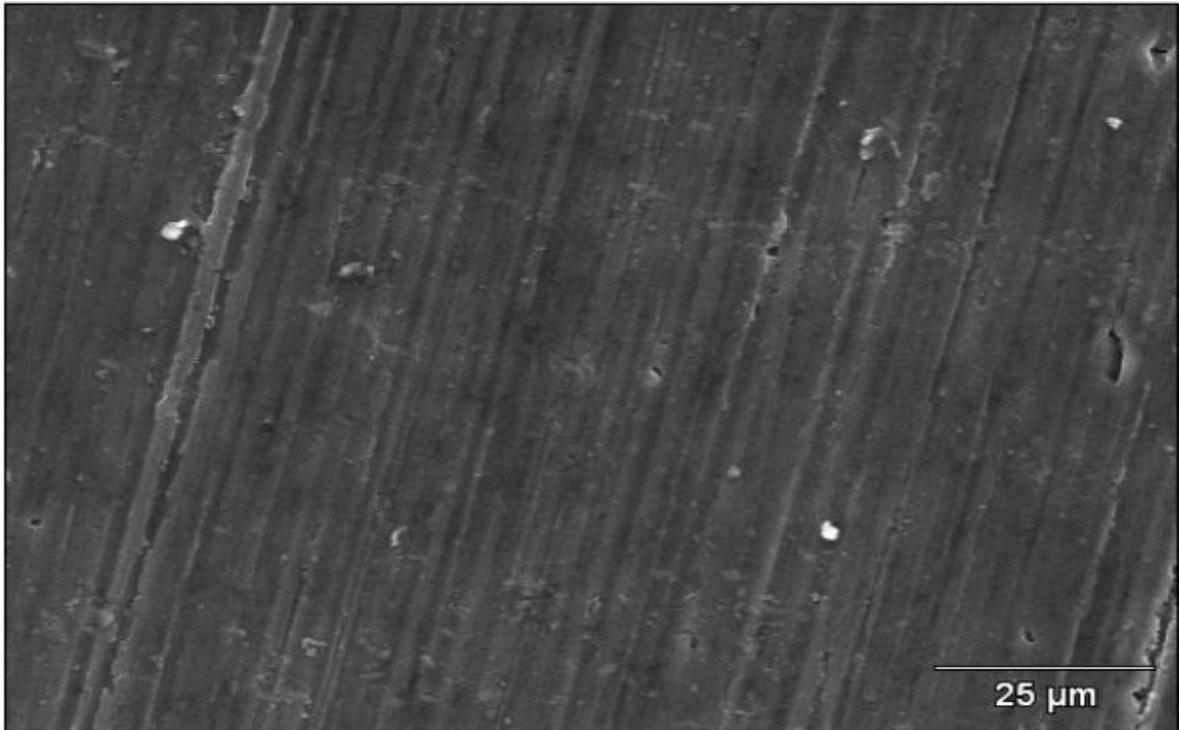
Figura 25: Microscopia por MEV da liga de Alumínio AA ASTM 6060-T5 tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano com magnificação de 1000x.



Fonte: próprio autor.

Ao fazer-se uma análise da Figura 25, comparativamente à Figura 24 é possível perceber que a liga de Alumínio AA ASTM 6060-T5 tratada com o revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano apresenta um bom nível de preenchimento e que o revestimento se aderiu à superfície do alumínio acompanhando os defeitos de superfície

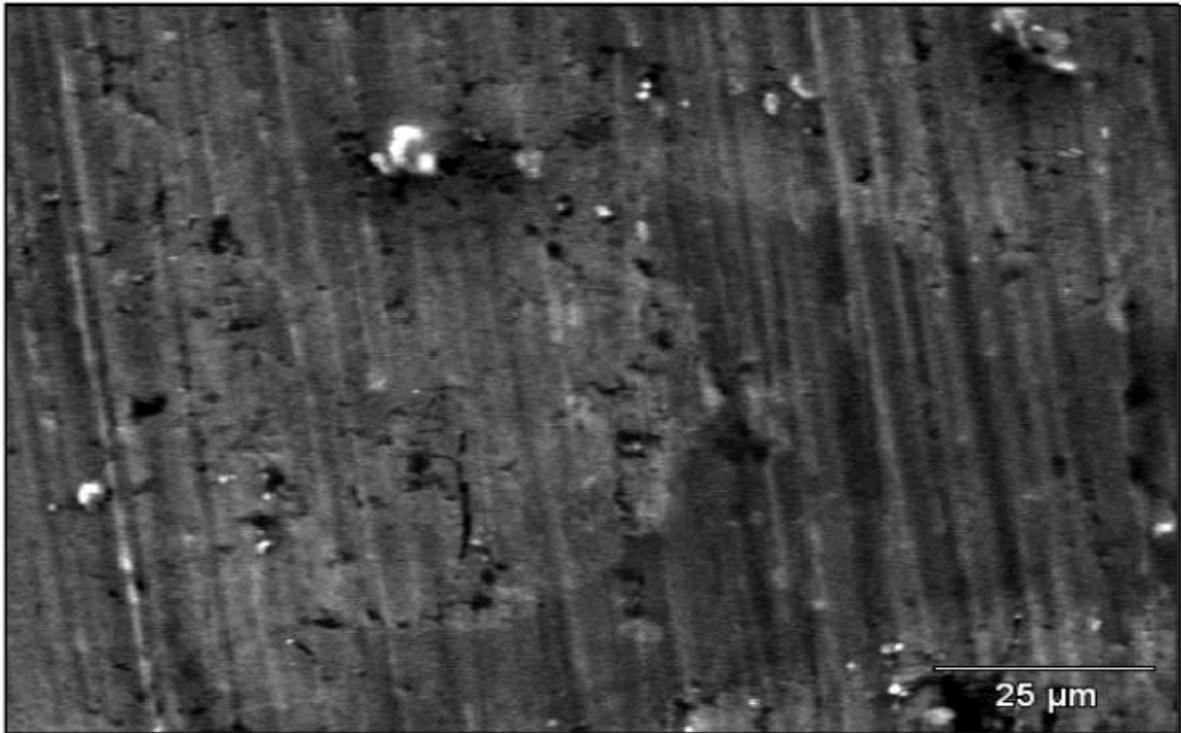
Figura 26: Microscopia por MEV da liga de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO não tratada com magnificação de 3000x.



Fonte: próprio autor

Analisando a Figura 26 referente ao cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO nu, observa-se a presença de uma superfície fina, compacta e aderente de óxido de cobre.

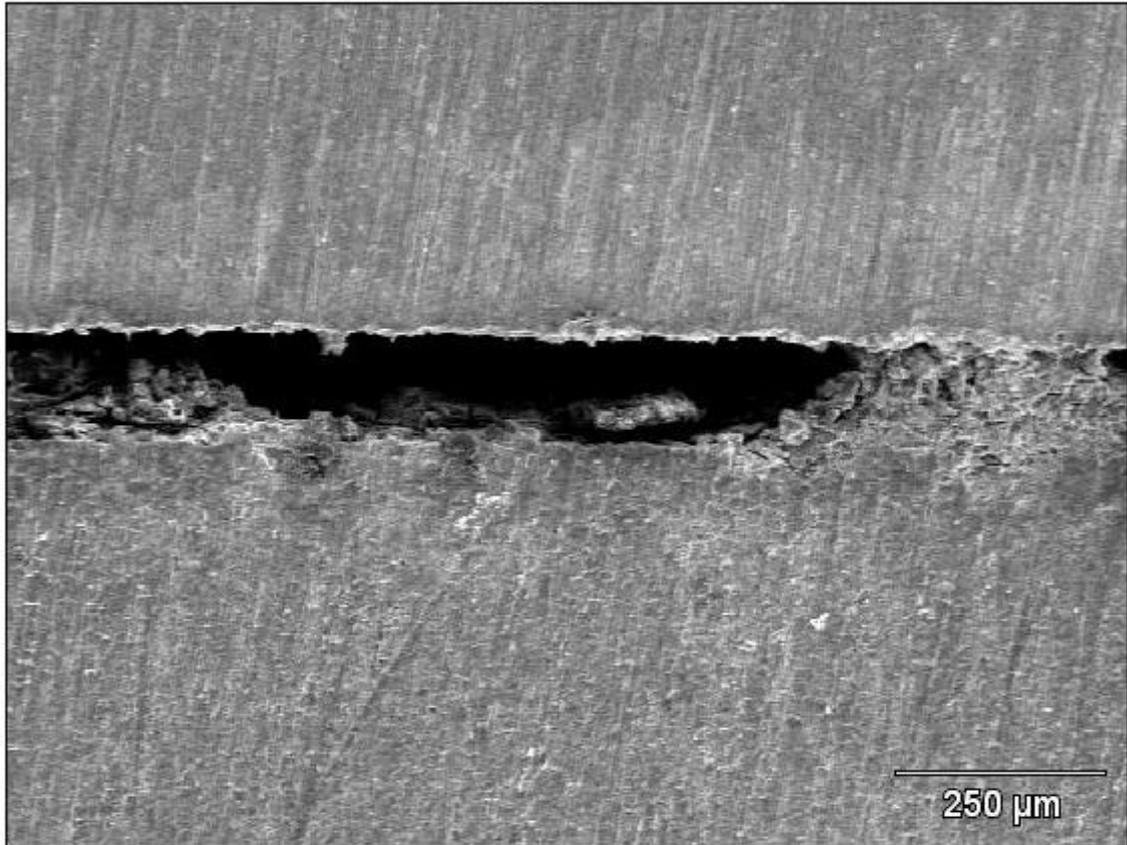
Figura 27: Microscopia por MEV da liga de cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano com magnificação de 1000x.



Fonte: próprio autor

Através da Figura 27, podemos observar uma deposição menos eficiente do cobre tratado com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano em relação ao alumínio tratado com o mesmo (Figura 25). Pode se perceber regiões descobertas que se deve ao fato de o cobre nu em contato com a solução de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano (pH=10) formar hidróxido de cobre, ocasionando assim uma camada mais porosa comparada ao óxido de cobre.

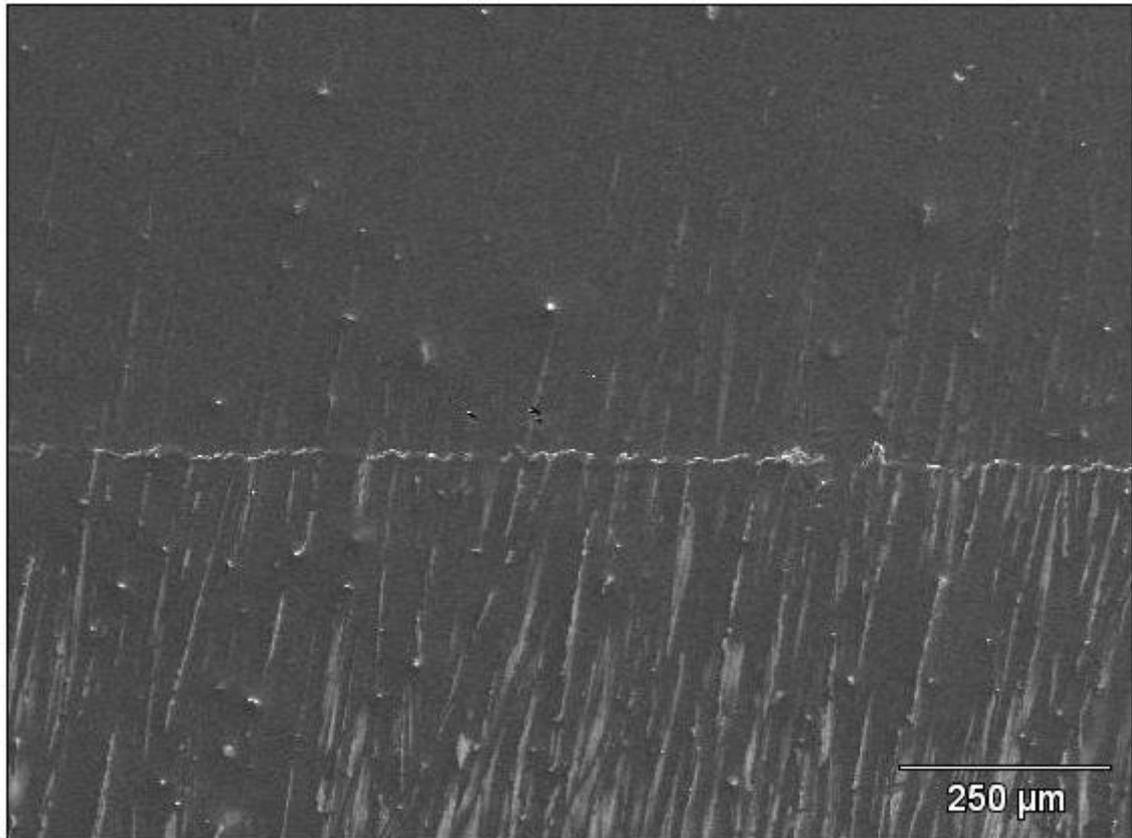
Figura 28: Microscopia por MEV da junta soldada FSW do tipo Alumínio AA ASTM 6060-T5/Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO não tratada com magnificação de 3000x.



Fonte: Próprio autor.

A figura 28 ilustra uma grande região da junta soldada FSW do tipo Alumínio AA ASTM 6060-T5/Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO completamente exposta, com vazios perceptíveis devido ao fato da junta soldada alumínio-cobre ter a formação de pares galvânicos, originando assim uma grande região de corrosão.

Figura 29: Microscopia por MEV da junta soldada de Alumínio AA ASTM 6060-T5/ cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano com magnificação de 1000x.



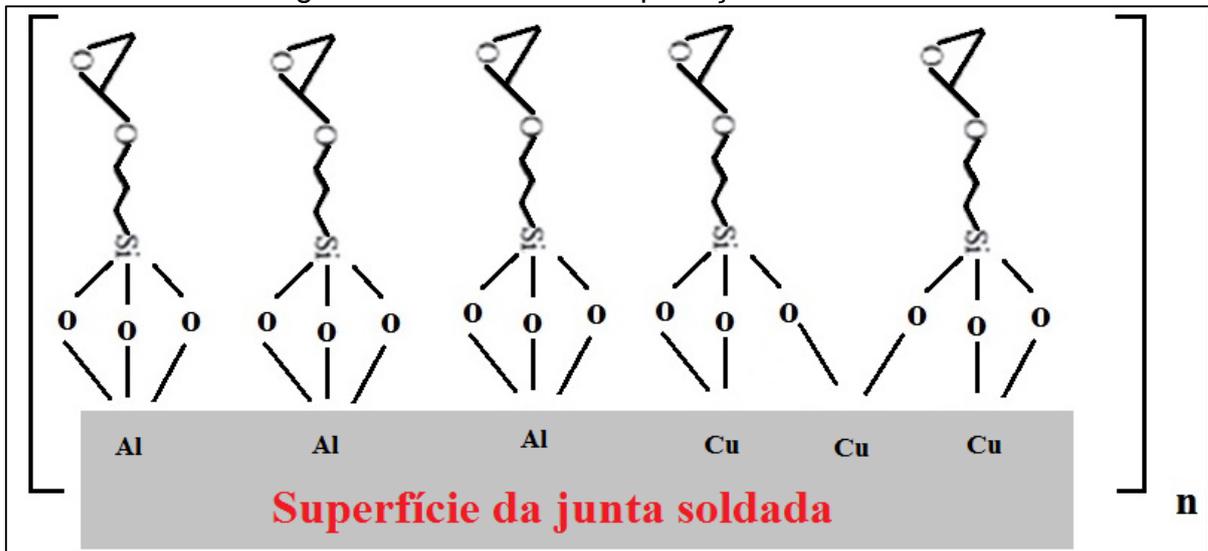
Fonte: Próprio autor

A figura 29 ilustra o surgimento de uma região totalmente recoberta pelo revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano na junta soldada de Alumínio AA ASTM 6060-T5/ cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano. Na região superior temos posicionada a placa de alumínio e na região inferior a placa de cobre.

Logo, é plausível propor um mecanismo de proteção de corrosão destes materiais conforme a Figura 30.

Os grupamentos - (Si-O) formam ligações metaloxano (metal- oxigênio-silício) com o alumínio (Al-O-Si) e com o cobre (Cu-O-Si) proporcionando a formação de uma camada de conversão sobre a superfície metálica e formando uma camada barreira contra a corrosão. O alumínio por ser trivalente faz três ligações metaxalona e o cobre por ser divalente faz duas ligações metaloxano.

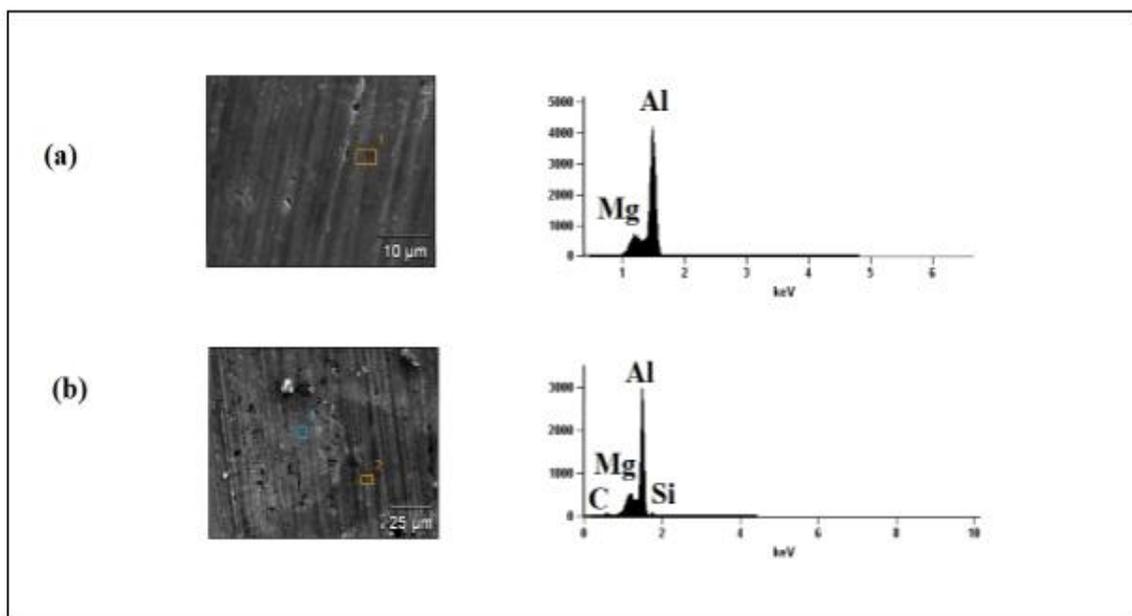
Figura 30: Mecanismo de proteção de corrosão.



Fonte: Próprio autor.

As Figuras 31 a 34, ilustram o MEV com análise de espectrômetro de energia dispersiva de raio x (EDS).

Figura 31: MEV com análise EDS para a liga de Alumínio AA ASTM 6060-T5 não tratado (a) e tratado (b) com o 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.

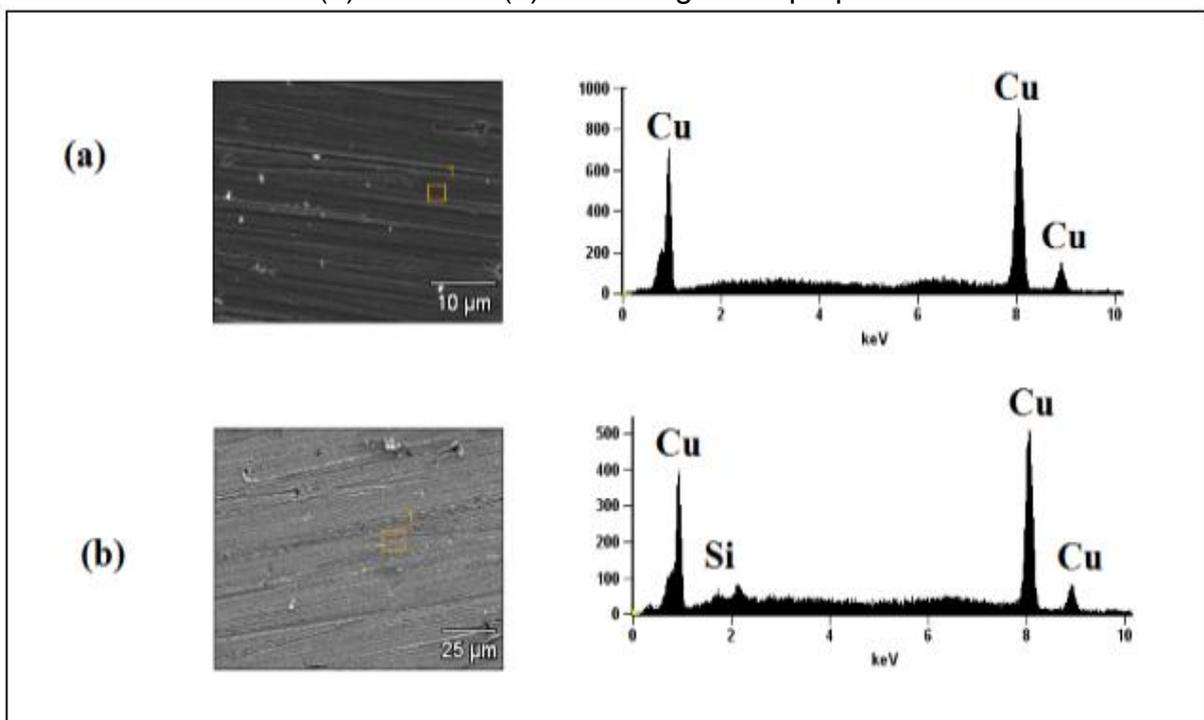


Fonte: Próprio autor

Através da figura 31 (a) pode-se perceber que a liga de alumínio AA ASTM 6060-T5 não tratada, possui a presença de magnésio, o que de fato já era esperado

devido magnésio ser um dos componentes da liga de alumínio, já a figura 31 (b) com o revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano, nota-se a presença de carbono, de silício e também do magnésio. Os picos referentes a presença de silício apesar de um tanto irregular e de carbono no metal, provam a deposição eficaz de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano na superfície do alumínio. O 3-glicidoxipropil-trimetoxe-silano provavelmente formou uma reação de condensação de com o hidróxido de alumínio, gerando assim passividade e, mitigando a corrosão do alumínio.

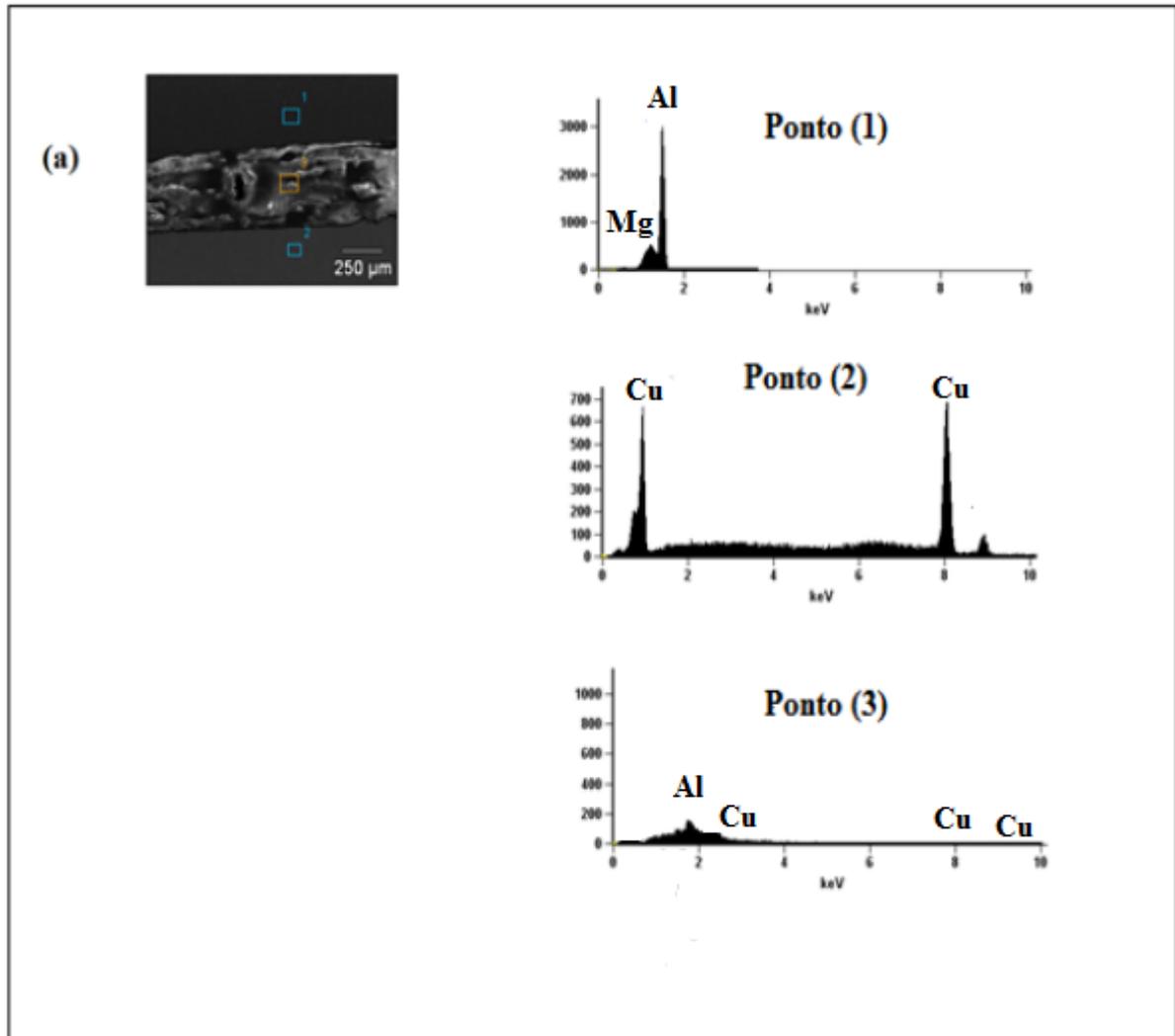
Figura 32: MEV com análise EDS para a liga de Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera $\frac{1}{2}$ não tratado (a) e tratado (b) com o 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.



Fonte: Próprio autor.

Ao fazer a análise da figura 32 (a) do Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera $\frac{1}{2}$ não tratado, consegue-se visualizar apenas a presença de cobre como constituinte, o que já era esperado, já quando analisamos a figura 32 (b) tratada com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano, percebemos a presença de um pico de silício, o que prova a deposição eficaz de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano na superfície do metal, concordando assim com Ramos (2009) que constatou que filmes de silano melhoram a resistência à corrosão do cobre.

Figura 33: MEV com análise EDS para a junta soldada FSW de Alumínio 6060-T5 / Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO conjunta não-revestida em diferentes posições.

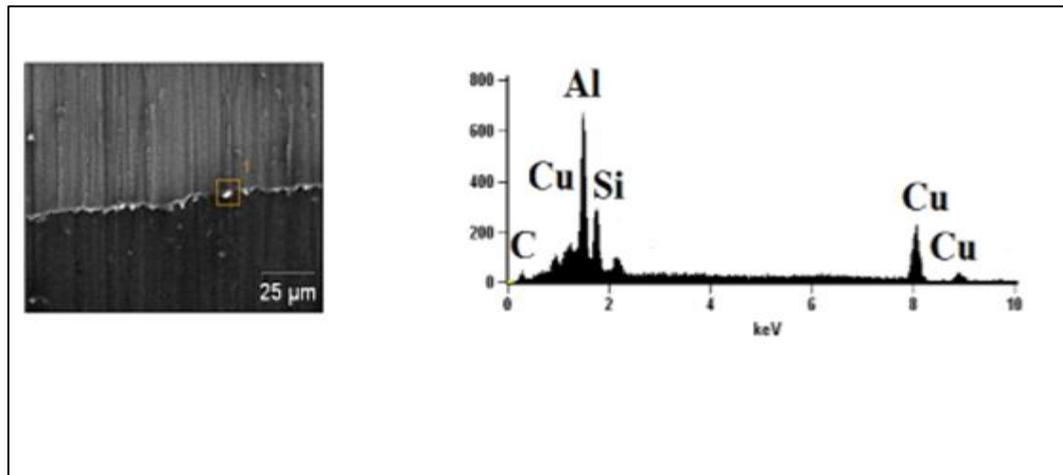


Fonte: Próprio autor.

A figura 33, ilustra o comportamento da Junta soldada FSW do tipo alumínio 6060-T5/cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO em diferentes pontos sem o revestimento.

No ponto 1 observa-se picos referentes a presença de alumínio e magnésio no alumínio 6060-T5. O ponto 2 mostra picos referentes a presença de cobre no cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO. Já no ponto 3, região onde temos a solda FSW do tipo alumínio 6060-T5/cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO, nota-se a presença de alumínio e cobre, constituintes de ambas as ligas.

Figura 34: MEV com análise EDS para a junta soldada FSW do tipo Alumínio 6060-T5 /Cobre ASTM-B-187 C110-Têmpera ½ DURO 110 revestida com 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 34 ilustra que, no ponto 1, após o tratamento com o revestimento de 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano temos a presença de picos característicos de alumínio, cobre, silício e carbono, o que de fato era esperado, denotando a aderência do 3-glicidoxipropil-trimetoxi-silano na junta soldada.

5 CONCLUSÕES

Como principais resultados, ficou comprovado que:

1-A técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica e polarização anódica e catódica consistiram em técnicas eficientes para avaliação do processo corrosivo destes materiais;

2-O revestimento e/ou recobrimento a partir de uma solução hidroalcoólica contendo 3-Glixidoxipropil-trimetoxi-silano proporcionou a mitigação de processos corrosivos na superfície da junta soldada bem como das ligas isoladas;

3-Como era de se esperar a eficiência de proteção contra a corrosão foi maior quando depositada sobre o alumínio já que os grupamentos silanois se aderem mais favoravelmente sobre óxido de alumínio.

4-Este procedimento, se melhor otimizado (pH do banho, processo de cura, etc...) tem grandes possibilidades de aplicação industrial como tratamento anticorrosivo.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a realização de trabalhos futuros sugere-se:

- A realização de ensaios corrosivos mais específicos, a fim de analisar a corrosão intragranular da junta soldada FSW do tipo alumínio/cobre;
- Estudar a utilização de diferentes tipos de revestimentos, o qual poderá acarretar uma melhora ainda maior da corrosão na junta soldada.
- Analisar variados tipos de pH, a fim de estipular o pH do revestimento 3-Glixidoxipropil-trimetoxi-silano que tenha o maior poder de mitigação da corrosão.
- Encontrar um processo de cura ótimo a fim de diminuir ainda mais a corrosão.

REFERÊNCIAS

ABDOLAH-ZADEH, A., SAEID, T., **Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints**. Journal of alloys and compounds, 460, p.535-538, 2008.

American Welding Society Welding Handbook – Welding Processes. Volume 2, Miami, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO ABAL, **Fundamentos e aplicações do alumínio**, São Paulo, editora ABAL, maio 2007.

BOSSARDI, K. **Nanotecnologia aplicada a tratamentos superficiais para o aço-carbono 1020 como alternativa ao fosfato de zinco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, quinta edição, São Paulo, LTC, 2002.

CASPERS, C., **Estudos Eletroquímicos de Uma Célula Termo galvânica de Cobre Empregando Diferentes Líquidos Iônicos Como Eletrólito**. 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DAVIS, J. R., **Aluminum and aluminum alloys**- ASM Specialty Handbook, 1993.

DAVIS, J. R., **Corrosion: Understanding the Basics**, United States of America: ASM International, 2000.

FONTANA, M. **Corrosion engineering**, McGraw-Hill, New York, 1986.

GALVÃO, I. et al. **Influence of aluminum alloy type on dissimilar friction stir lap welding of aluminum to cooper**, Journal of materials processing technology, v.213, p.1920-1928, 2013.

GALVELE, J. **Transport processes and the mechanism of pitting of metals**, Journal of the electrochemical society, v.206, p.132-1136, 2006.

GEARY, D., MILLER, R., **Soldagem**, segunda edição, Porto Alegre, Editora Bookman, 2013.

GENTIL, V., **Corrosão**, terceira edição, Rio de Janeiro, LTC – Livros técnicos e científicos Editora S.A, 1996.

GENEVOIS, C. **Interfacial reaction during friction stir welding of Al and Cu**. Metall mater trans, 42(8): 2290-5, 2011.

GENICOLO, M., **Estudo de viabilidade para implementação de uniões soldadas pelo método Friction stir welding em estruturas aeronáuticas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2007.

GEMELLI, E., **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**, LTC, Rio de Janeiro, 2001.

HOLZLE, L., **Comportamento Eletroquímico do Alumínio em misturas Etilenoglicol Água. Efeito de Adição de Agentes Quelantes**. 2005. 119 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HOULDCROFT, P. T., **Welding Process Techbology**, London, Cambridge University Press, 1979.

MARQUES, P.V, MODENESI, P.J., **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**, Belo Horizonte, 2009.

MATTSSON, E., **Basic Corrosion Technology**, New York, John Wiley & Sons, 1989.

MAALEKIAN, M., **Friction welding-Critical assessment of literature**. *Sci Technol Weld Join*, 12 (8): 738-759, 2007.

MENNUCCI, M., **Estudo da Corrosão do Cobre Em Meios de Sulfato e de Cloreto Com Auxílio do Microeletrodo Com Cavidade e de Uma Microcélula**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, M. **Estudo da influência de organo-silanos na resistência à corrosão de aço-carbono por meio de técnicas eletroquímicas**. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006).

OUYANG et al., **Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper**, *J Mater process technol*, 172: 110-122, 2006.

OKUMURA, T., TANIGUCHI, C., **Engenharia de Soldagem e Aplicações**, São Paulo, LTC, 1982.

PANNONI, F., GASPAR, C., VICENTIN, A. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**, Perfis Gerdau Açominas, quarta edição, Porto Alegre, 2007.

PANOSSIAN, Z., **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**, segunda edição, São Paulo, IPT, 1993.

RAMANATHAN, L. V., **Corrosão e seu controle**, São Paulo, Editora Hemus, 1998.

RAMOS, J. **Obtenção e caracterização de revestimentos protetores a base de silanos e sua ação combinada com tintas na proteção ao aço carbono**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

REYNOLDS, A. P., **Friction stir welding of aluminum alloys**, Handbook of aluminum: Volume 2. Alloy production and materials manufacturing. New York: Marcel Dekker, 579-700, 2003.

RHODES et al., **Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum**, Scripta Mater, 36 (1): 69-75, 1997.

SANTOS, W., **Caracterização da resistência à corrosão de ligas de alumínio após tratamentos alternativos à cromatização, com e sem revestimento orgânico**. 2011. Dissertação (Mestrado em ciências na área de tecnologia nuclear) – Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo, 2011.

SILVA et al., **Soldagem por fricção: projeto de adaptação do processo em torno mecânico para fins didáticos**. 2010. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – ETEC, Santos, 2010.

SHIMIZU, K.; FURNEAUX, R., **Oxidation of Aluminum**, V.35, p.427, 1991.

TAN, C. **Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al-cu joints produced by friction stir welding**, Materials and design, 466-473, 2013.

TOLEDO, R., **La Corrsión Em El Cobre y Sus Aleacione**, (201-?). Science Corrosion, Santiago, (201-?). Não paginado.

THOMAS et al., **International patent application**, no. PCT/GB92/02203, 1991.

TWITE, R.L., BIERWAGEN, G.P., **Review of alternatives to chromate for corrosion protection of aluminum aerospace alloys**, Progress in Organic Coatings, v.33, p.91, 1998.

VILAÇA, P., **Fundamentos do Processo de Soldadura por Fricção Linear — Análise Experimental e Modelação Analítica**, PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Setembro 2003.

YILBAS et al., **Friction welding of St-Al and Al-Cu materials**, J Mater process technol, 49(3-4):431-443, 1995.

WAINER, E. et al., **Soldagem- Processos e Metalurgia**, São Paulo, AED. Edgar Blucher Ltda, 1992.

WOLYNEC, S., **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**, São Paulo, editora da Universidade de São Paulo, 2003.

APÊNDICES

ANEXOS