

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FERNANDA TARTARINI SANCHES

**ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO DA LIGA DE
ALUMÍNIO AA1100 EM FERTILIZANTES MISTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2017

UTFPR DAEMA	FERNANDA TARTARINI SANCHES ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA1100 EM FERTILIZANTES MISTOS	2017
----------------	---	------

FERNANDA TARTARINI SANCHES

**ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO DA LIGA DE
ALUMÍNIO AA1100 EM FERTILIZANTES MISTOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cleberson Cipriano de Paula

LONDRINA
2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais
Coordenação de Engenharia de Materiais



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA1100 EM FERTILIZANTES MISTOS

FERNANDA TARTARINI SANCHES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 14 de junho de 2017 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Dr. Márcio Andreato Batista Mendes
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Cleberson Cipriano de Paula
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Orientador

Prof. Dra. Délia do Carmo Vieira
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de Materiais

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores da UTFPR – Londrina que passaram pelo meu caminho e contribuíram para meu aprendizado e crescimento.

Ao meu orientador Dr. Cleberson Cipriano de Paula por toda paciência, dedicação e suporte para que este trabalho pudesse ser realizado.

Aos meu pais Ricardo Sanches e Margarete Tartarini Sanches e também ao meu irmão Gabriel Tartarini Sanches, por todo apoio e incentivo, não só durante a graduação, mas por toda minha vida.

Ao meu namorado João Paulo Galdino da Silva pelo companheirismo durante esses anos.

Aos amigos que me apoiaram e dividiram momentos de felicidade e apoio mútuo.

À Novelis e ao Sr. Eduardo Minniti pelo fornecimento da liga de alumínio necessária, sem a qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Muito obrigada a todos!

RESUMO

SANCHES, Fernanda T. ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA1100 EM FERTILIZANTES MISTOS. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

A liga de alumínio AA1100 é uma liga comercialmente pura (apresentando 99,00% de pureza) e apresenta excelente conformabilidade e resistência à corrosão, sendo por isso bastante utilizada nos setores químicos, elétricos, entre outros. Além disso, outra excelente propriedade apresentada pelo alumínio é a baixa massa específica, o que confere leveza em suas aplicações e o torna muito utilizado na indústria de transportes. Sendo assim, empresas utilizam alumínio para produção de silos rodoviários e caçambas que transportam, entre outros produtos, fertilizantes. Os fertilizantes são produtos bastante utilizados na agricultura e a corrosão causada por eles nos metais já é um problema conhecido, porém pouco estudado para a liga AA1100. A necessidade dessa pesquisa surgiu de um estudo de caso realizado em uma empresa localizada no Paraná, que constatou corrosão de suas caçambas de alumínio (liga AA1100), possivelmente, em função do transporte de fertilizantes mistos. Este trabalho teve por objetivo o estudo das características e susceptibilidade à corrosão da liga de alumínio AA1100, visando a avaliação da cinética de corrosão nesse material e de seu comportamento quando exposto aos fertilizantes mistos. Utilizando a técnica dos testes de intervalo planejado, foram realizados ensaios de imersão da liga de alumínio AA1100 em três composições de fertilizantes mistos, pelo qual se obteve as perdas de massa das amostras. Foram analisadas as taxas de corrosão média e penetração de corrosão para estudo do comportamento da liga em função do tempo. Concluiu-se que a referida liga é resistente à corrosão para essas composições de fertilizante e condições testadas. A corrosão constatada pela empresa pode ter ocorrido também por outros motivos, como utilização de um material diferente do informado ou de um meio corrosivo ainda não analisado.

Palavras-chave: Alumínio. Corrosão. Fertilizantes mistos. Caçambas. Ensaios de imersão.

ABSTRACT

SANCHES, Fernanda T. AN INVESTIGATION OF THE CORROSION SUSCEPTIBILITY OF AA1100 ALUMINUM ALLOY IN MIXED FERTILIZERS. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

The AA1100 aluminum alloy is a commercially pure alloy (99.00% pure) that has an excellent conformability and corrosion resistance, having a great use in the chemical and electrical industries. Furthermore, other excellent property presented by the aluminum is the low specific weight which makes it very used in the transportation industry because of the lightness. Currently, many companies are using aluminum alloys to produce mobile silos and trailers that carry fertilizers and other products. The fertilizers are very used and the corrosion caused by them is a well-known problem; however, it was not very studied for the AA1100 aluminum alloy. The need for this investigation came up from a case study carried out in a company from Parana that found a possible corrosion in their trailers (made with AA1100 alloy) because of carrying mixed fertilizers. The goal of this project was the investigation of the characteristics and corrosion susceptibility of the AA1100 aluminum alloy in order to evaluate the corrosion kinetics on this material and its behavior when exposed to mixed fertilizers. Using the planned interval test, immersion tests of the AA1100 aluminum alloy was performed on three compositions of mixed fertilizers, providing the mass losses information of each sample. The corrosion rate and penetration of corrosion were evaluated in order to study the alloy behavior according to time. It was concluded that the referred alloy is resistant to corrosion for that fertilizer compositions and conditions evaluated. The corrosion found by the company could either have happened because of the use of a different material or a corrosive environment not yet analyzed.

Keywords: Aluminum. Corrosion. Mixed fertilizers. Trailers. Immersion tests.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura das ligas de alumínio conformadas	15
Tabela 2 – Nomenclatura das ligas de alumínio para fundição	16
Tabela 3 – Composição química da liga AA1100 de acordo com ASTM B209-06....	17
Tabela 4 – Propriedades de algumas ligas de alumínio.....	17
Tabela 5 – Condições de digestão da bauxita em plantas comerciais.....	20
Tabela 6 – Propriedades mecânicas típicas a temperatura ambiente para liga de alumínio 1100 com têmpera H14.....	28
Tabela 7 – Composição dos fertilizantes NPK utilizados.	28
Tabela 8 – Interpretação do teste de intervalo planejado.....	30
Tabela 9 – Combinações de interpretações do teste de intervalo planejado	31
Tabela 10 – Planejamento das amostras por semana	31
Tabela 11 – Resistência relativa do alumínio e suas ligas à corrosão	33
Tabela 12 – Valores de pH para as composições de fertilizantes antes do ensaio (inicial) e depois do ensaio.....	37
Tabela 13 – Taxa de corrosão da amostra 3 (5 semanas) de cada composição.	46
Tabela 14 – Amostras imersas em fertilizante misto 10-10-10 a 50 °C.....	54
Tabela 15 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 10-10-10 a temperatura ambiente	54
Tabela 16 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 4-14-8 a 50 °C	55
Tabela 17 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 4-14-8 a temperatura ambiente	55
Tabela 18 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 15-5-5 a 50 °C	56
Tabela 19 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 15-5-5 a temperatura ambiente	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão da utilização do alumínio por área industrial no Brasil.....	11
Figura 2 – Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio.....	15
Figura 3 – Esquema do Processo Bayer.....	20
Figura 4 – Esquema de uma célula Hall-Héroult industrial.....	23
Figura 5 – Diagrama de Pourbaix para o alumínio.....	24
Figura 6 – Perda de massa da liga 3004-H14 exposta por 1 semana a água destilada em solução de diferentes pH utilizando HCl e NaOH.....	25
Figura 7 – Fluxo de produção de fertilizantes NPK segundo empresa de fertilizantes Fosfertil.....	27
Figura 8 – Teste de intervalo planejado.....	30
Figura 9 – Aparato utilizado para ensaio de imersão.....	32
Figura 10 – Mudança de coloração em duas amostras (a e b) após o testes em comparação com amostra padrão (c).....	34
Figura 11 – Penetração de corrosão obtida por amostra durante ensaio em fertilizantes mistos a 50 °C e temperatura ambiente.....	35
Figura 12 – Taxa de corrosão obtida por amostra durante ensaio em fertilizante misto 10-10-10 a 50 °C e temperatura ambiente.....	38
Figura 13 – Taxa de corrosão obtida por amostra durante ensaio em fertilizante misto 4-14-8 a 50 °C e temperatura ambiente.....	38
Figura 14 – Taxa de corrosão obtida por amostra durante ensaio em fertilizante misto 15-5-5 a 50 °C e temperatura ambiente.....	39
Figura 15 – Taxa de corrosão por tempo para composição 10-10-10 a 50 °C e a temperatura ambiente.....	40
Figura 16 – Taxa de corrosão por tempo para composição 4-14-8 a 50 °C e a temperatura ambiente.....	40
Figura 17 – Taxa de corrosão por tempo para composição 15-5-5 a 50 °C e a temperatura ambiente.....	41
Figura 18 – Micrografias da superfície da amostra padrão a 100x e 500x realizado por MEV.....	42
Figura 19 – Micrografias da superfície da amostra 3 para composição 4-14-8 a 50 °C (100x e 800x).....	42

Figura 20 – Micrografias da superfície da amostra 3 para composição 15-5-5 a temperatura de 50 °C.	43
Figura 21 – Micrografia da superfície da amostra 3 para composição 10-10-10 a temperatura de 50 °C.	43
Figura 22 – Micrografia da superfície da amostra 4 para composição 10-10-10 a temperatura de 50 °C.	44
Figura 23 – Micrografia da seção transversal da amostra 4 da composição 4-14-8 a temperatura de 50°C.	44
Figura 24 – Micrografia da superfície da amostra 4 para composição 15-5-5 a temperatura de 50 °C.	45
Figura 25 – Espectro de raio-x por dispersão de energia obtido da região circulada na Figura 24.	46

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for testing and Materials</i>
EDS	Espectroscopia de Raios X por dispersão em Energia
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio (formulação de fertilizantes mistos)
XPS	Espectroscopia de Fotoelétrons excitados por Raios X

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	14
2.1.1 Liga de Alumínio AA1100	16
2.2 OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO	18
2.2.1 Processo Bayer	19
2.2.2 Processo Hall-Héroult	22
2.3 CORROSÃO EM ALUMÍNIO	23
2.3.1 Fertilizantes Mistos (NPK)	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 TESTES DE IMERSÃO	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5 CONCLUSÕES	47
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICES	54

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal que apresenta excelentes propriedades físico-químicas, como: alta condutibilidade térmica e elétrica, baixo peso específico, reciclagem e resistência à corrosão. Esse conjunto de propriedades possibilita ao alumínio uma ampla gama de aplicações, sendo ele o metal não-ferroso mais consumido do mundo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007).

O alumínio é extraído da natureza na forma de bauxita, um importante e abundante minério, e sua importância econômica surgiu no final do século XIX após a invenção do Processo Bayer e do Processo Hall-Héroult (DAVIS, 1999).

A Figura 1 mostra a divisão do uso do alumínio em diferentes segmentos industriais no Brasil.

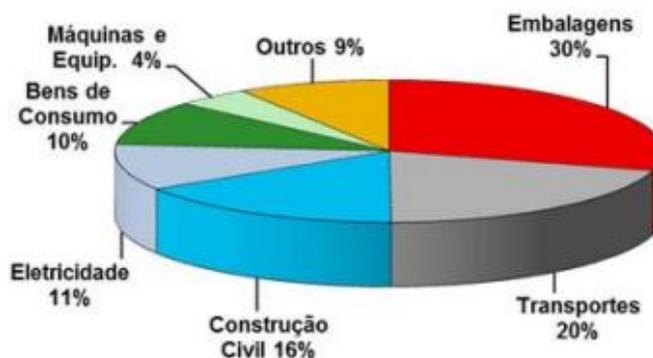


Figura 1 – Divisão da utilização do alumínio por área industrial no Brasil
Fonte: Oliveira (2015).

A excelente resistência à corrosão do alumínio se deve a capacidade do material de formar uma camada passiva de óxido em sua superfície, que o protege funcionando como uma barreira contra a corrosão. Entretanto, certas condições são muito severas e essa camada acaba sendo destruída, deixando o alumínio susceptível a corrosão (OLIVEIRA, 2015).

A corrosão é um processo natural e ocorre pela interação do material (comumente metal) com o ambiente que o cerca, causando a deterioração de suas propriedades (DAVIS, 2000).

Corrosão é um dos maiores e mais frequente problema nas indústrias, aparecendo em diversas atividades, como por exemplo nas indústrias petrolífera, química, de transportes, na medicina (próteses), esculturas, etc. (GENTIL, 1996). Por conta disso, as perdas econômicas são grandes e estão relacionadas a consequências diretas e indiretas (troca de equipamento danificado, manutenção preventiva, contaminação de produto, perda de eficiência, entre outros). Além disso, os efeitos da corrosão vão além dos efeitos econômicos e podem trazer consequências sociais e ao meio ambiente, interferindo na segurança (súbita falha que pode acarretar explosão, desmoronamento, etc.) e saúde (poluição pelo escape de produtos) (DAVIS, 2000).

A corrosão está também presente na agricultura, já que muitos produtos químicos são utilizados em contato com metais durante o processo de produção, armazenagem e transporte.

Fertilizantes são produtos químicos amplamente utilizados e podem ser encontrados em diversas formulações. Esses produtos são corrosivos, especialmente em seu estado líquido, reagindo entre si e gerando produtos agressivos e que diminuem o pH do sistema, afetando o material metálico em contato (VREELAND e KALIN, 1956).

Além disso, a corrosividade do fertilizante depende da sua composição e segundo Hatfield, et al. (1958, p. 525), o aumento da razão entre fosfato e nitrogênio aumenta a corrosividade do fertilizante em alumínio. Sendo assim, a corrosão do alumínio causada por fertilizantes pode ser bastante danosa, causando a perda de massa do material, redução da espessura da peça metálica levando a perda de propriedade mecânica e falha estrutural, contaminação do produto, adição de custos extras, entre outros problemas (EKER e YUKSEL, 2005).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi o estudo da susceptibilidade à corrosão da liga de alumínio AA1100 em fertilizante misto (NPK) de diferentes formulações.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos foram:

1. Investigar se há a presença de processos corrosivos na liga AA1100 quando exposta aos fertilizantes mistos;
2. Determinação da perda de massa da liga AA1100 em ensaios de imersão;
3. Determinação da cinética de corrosão da liga de alumínio AA1100 em contato com diferentes formulações de fertilizantes mistos;
4. Determinação dos possíveis tipos de corrosão encontrados na liga AA1100 por meio da microscopia óptica e da microscopia de varredura;
5. Estudo de métodos protetivos caso fosse detectado processo corrosivo.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho teve origem na solicitação de um estudo de caso por uma empresa de transportes que encontrou problemas relacionados a corrosão. Essa empresa faz a montagem de caçambas de caminhões (possivelmente utilizando chapas da liga de alumínio AA1100), as quais foram, provavelmente, responsáveis pelo transporte de fertilizantes mistos (NPK), apesar de não terem sido projetados para tal.

Na literatura, foram encontrados dados referentes a corrosão causada por fertilizantes voltadas especialmente para aços ou outras ligas de alumínio. Foi encontrado um único estudo a respeito da liga AA1100 (HATFIELD, et al., 1958), porém este estudo não possui dados suficientes em relação a cinética de corrosão, tipos de corrosão e tempo de vida útil que o material teria em contato com esse meio.

Portanto, estudar as características de corrosão dessa liga no referido meio foi importante para ampliar o conhecimento a respeito da liga e seu comportamento sob ação dos fertilizantes mistos e, assim, reduzir os custos gerados pelo problema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio é o metal mais abundante (7,5-8,1%) da crosta terrestre e o segundo metal mais importante para indústria e comércio. A produção mundial de alumínio é de aproximadamente 20 milhões de toneladas por ano e uma quantidade similar é reciclada no mesmo período, sendo a reciclagem de alumínio importante para sua indústria atualmente (GHALI, 2010).

O alumínio é um metal que possui uma excelente combinação de propriedades, o que resulta em uma ampla aplicação em diferentes campos da engenharia. Além disso, pode ser facilmente transformado utilizando todos os processos metalúrgicos, sendo viável em qualquer forma necessária o que o torna um material de fácil aplicação (OLIVEIRA, 2009).

Esse metal possui um baixo ponto de fusão de 660 °C (99,80% de pureza) quando comparado ao aço (1500 °C), sendo que suas ligas possuem um ponto de fusão ainda mais baixo. Outra característica do alumínio é sua leveza, possuindo um peso específico de apenas 2,70 g/cm³, o que é visto como vantagem para diversas aplicações, especialmente para indústria aeronáutica e de transportes em geral. Além disso, o alumínio apresenta outros importantes atributos como: excelente condutividade térmica e elétrica, impermeabilidade e opacidade, alta relação resistência/peso, durabilidade, moldabilidade e soldabilidade, resistência à corrosão e reciclabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007; OLIVEIRA, 2009).

Alumínio puro possui uma relativa baixa resistência mecânica, sendo que as ligas de alumínio possuem uma resistência mecânica maior por conta dos efeitos dos elementos de liga. Por conta disso, muitas são as ligas de alumínio que podem ser encontradas por sua facilidade de se ligar com os mais importantes metais de engenharia.

As ligas de alumínio são divididas entre ligas trabalhadas mecanicamente e ligas para produção de peças fundidas, sendo que cada categoria possui divisões de acordo com o elemento de liga e baseado no mecanismo primário de desenvolvimento

de propriedades (tratáveis termicamente e não tratáveis termicamente), assim como mostrado na Figura 2 (DAVIS, 1993).

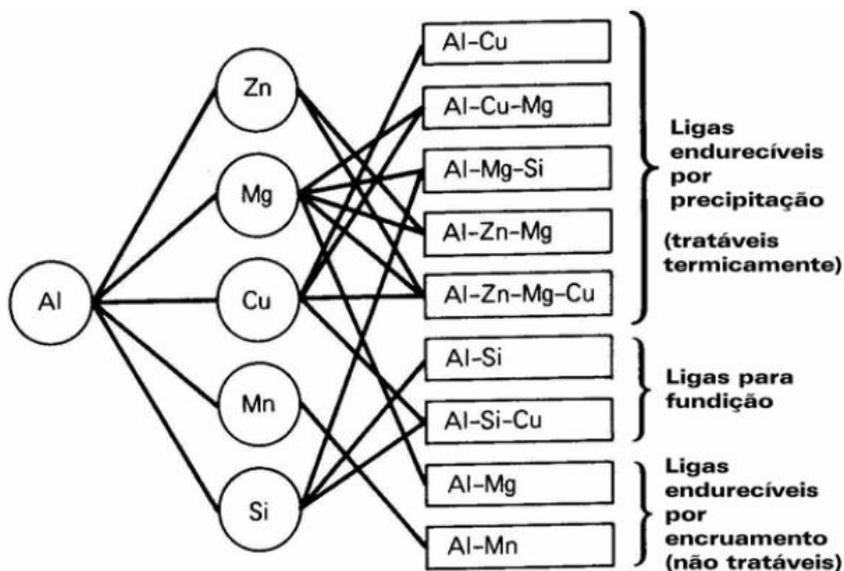


Figura 2 – Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio
Fonte: Starke e Staley (1996).

Para as ligas trabalhadas mecanicamente é empregado um sistema de quatro dígitos, segundo ABNT e ASTM (AA), para classificação de acordo com sua composição, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Nomenclatura das ligas de alumínio conformadas

Classificação – ABNT/ASTM (AA)	Principal elemento de liga
1xxx	Comercialmente pura ($\geq 99,00\%$)
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Lítio e Estanho
9xxx	Reservada para o futuro

Fonte: Adaptado de Davis (1993).

A série 1xxx é responsável pelas ligas com no mínimo 99,00% de pureza, sendo que os dois últimos dígitos da nomenclatura (1xxx) indicam a pureza do alumínio acima dos 99%. Por exemplo, se a liga for 1050, significa que a pureza é de 99,50%. Já o segundo dígito indica (1xxx) o controle especial de uma ou mais impurezas ou a adição de algum elemento de liga (SOUZA, 2012; OLIVEIRA, 2009).

Para as ligas para fundição é empregado um sistema de três dígitos e um número decimal, sendo que 0.1 e 0.2 dizem respeito a composição dos lingotes. A Tabela 2 mostra a nomenclatura das ligas de alumínio para fundição.

Tabela 2 – Nomenclatura das ligas de alumínio para fundição

Classificação – ABNT/ASTM (AA)	Principal elemento de liga
1xx.x	Comercialmente pura ($\geq 99,00\%$)
2xx.x	Cobre
3xx.x	Silício com adição de cobre e/ou magnésio
4xx.x	Silício
5xx.x	Magnésio
6xx.x	Não usada
7xx.x	Zinco
8xx.x	Estanho
9xx.x	Outros elementos

Fonte: Adaptado de Ghali (2010).

2.1.1 Liga de Alumínio AA1100

Como explicado na seção anterior (seção 2.1), a série 1xxx contém as ligas com no mínimo 99,00% de pureza e os dois últimos dígitos da nomenclatura indicam a pureza do alumínio acima dos 99%. Portanto, a liga AA1100 apresenta 99,00% de pureza e possui o controle de um volume mínimo e máximo de cobre especificado (GHALI, 2010). A Tabela 3 mostra a composição química dessa liga de acordo com a norma ASTM B209-06.

Tabela 3 – Composição química da liga AA1100 de acordo com ASTM B209-06

Elemento	Composição %
Silício + Ferro	0-0,95
Cobre	0,05-0,20
Manganês	0,0-0,05
Zinco	0,0-0,10
Outros (cada)	0,05
Outro (total)	0,15
Alumínio	Balanço (99,00 min)

Fonte: American Society for Testing and Materials (2006).

Essa liga é utilizada em aplicações que exijam resistência mecânica razoável e boa conformabilidade, sendo que é uma liga não tratável termicamente, mas que pode ter suas propriedades melhoradas por trabalho a frio (SOUZA, 2012).

Ligas da série 1xxx são aplicadas especialmente nos setores químicos e elétricos por possuírem excelente resistência à corrosão e alta condutividade térmica e elétrica. Exemplos de uso são: indústrias alimentícias, químicas, bebidas, tocadores de calor ou utensílios domésticos. Além disso, a liga AA1100 pode ser utilizada em construção civil para decoração e indústria moveleira (OLIVEIRA, 2009; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007).

Algumas propriedades da liga AA1100 são demonstradas e comparadas a outras ligas da série 1xxx na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades de algumas ligas de alumínio**(continua)**

Principais propriedades	Classificação do alumínio			
	AA1100	AA1050	AA1070	AA1199
Número atômico	13	13	13	13
Peso atômico	26,98	26,98	26,98	26,98
Estrutura cristalina	CFC	CFC	CFC	CFC
Parâmetro de rede (Å)	—	—	—	4,04
Ponto de fusão (°C)	657	658,4	658,9	660,24
Densidade a 20 °C da liga (g/cm ³)	2,710	2,705	2,703	2,698
Condutividade elétrica a 20 °C da liga (IACS)	59,0%	61,3%	—	64,5%
Resistividade elétrica a 20 °C da liga (nΩ.m)	29,2	28,1	—	26,7

Tabela 4 – Propriedades de algumas ligas de alumínio

Principais propriedades	(conclusão)			
	Classificação do alumínio			
	AA1100	AA1050	AA1070	AA1199
Condutividade térmica a 20 °C da liga (W/m.K)	222	231	—	243
Limite de resistência a tração (MPa)	90	76	—	45
Limite de escoamento (MPa)	34	28	—	10
Alongamento (%)	35	39	—	50
Módulo de elasticidade (GPa) - (tração)	69	69	—	62
(cisalhamento)	26	25	—	25
Resistência à fadiga (MPa)	34	—	—	—
Dureza (HB)	23	—	20	15

Fonte: Adaptado de Oliveira (2009).

2.2 OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO

Como citado anteriormente (seção 2.1), o alumínio é o metal mais abundante da crosta terrestre e o terceiro elemento químico mais abundante. Apesar disso, ele não é encontrado em sua forma metálica na natureza, o que ocorre por sua alta afinidade pelo oxigênio. Sendo assim, ele é encontrado como íon Al^{3+} combinado a outros elementos em rochas ígneas (feldspatos, micas, etc.) e minerais (criolita, espinélio, coríndon, etc.) (CONSTANTINO, et al., 2002).

O minério de importância industrial para obtenção do alumínio é a bauxita. A bauxita é formada em regiões tropicais e subtropicais graças ao intemperismo sobre aluminossilicatos sendo uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratados ($[AlO_x(OH)_{3.2x}]$, $0 < x < 1$). A gibbsita ($\gamma-Al(OH)_3$), boehmita ($\gamma-AlO(OH)$) e diaspório ($\alpha-AlO(OH)$) são os principais constituintes da bauxita (CONSTANTINO, et al., 2002).

Para ser economicamente viável a produção de alumínio, a bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) utilizável (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007).

A primeira etapa para obtenção do alumínio é a mineração da bauxita, que tem início na remoção planejada da vegetação e do solo orgânico e é seguida pela retirada das camadas superficiais do solo (argilas e lateritas). O próximo passo da

mineração é o beneficiamento que é dividido em britagem, lavagem do minério com água (para redução do teor de sílica contido na parcela mais fina) e secagem (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007).

A segunda etapa é a refinaria, na qual se obtém a alumina (Al_2O_3) que pode ser utilizada em diversas outras aplicações. Para obtenção de alumina existem o Processo Bayer e a Eletrofusão. Porém, para a subsequente obtenção de alumínio, o processo mais utilizado nessa fase é o processo Bayer, cuja caracterização será dada na seção 2.2.1.

A terceira e última etapa é a redução do alumínio, na qual o processo mais utilizado é o Hall-Héroult que será discutido na seção 2.2.2.

2.2.1 Processo Bayer

O processo Bayer foi desenvolvido e patenteado em 1888 por Karl Josef Bayer e foi originalmente desenvolvido para utilização na indústria têxtil, uma vez que Al_2O_3 é utilizada como fixador para tingimento de algodão. Entretanto, esse processo se tornou importante para metalurgia apenas após sua associação ao processo Hall-Héroult para obtenção do alumínio metálico (HABASHI, 2005).

Esse processo é, usualmente, dividido em quatro etapas: digestão, clarificação, precipitação e calcinação (SILVA FILHO, ALVES e DA MOTTA, 2007).

A Figura 3 mostra o esquema do Processo Bayer.

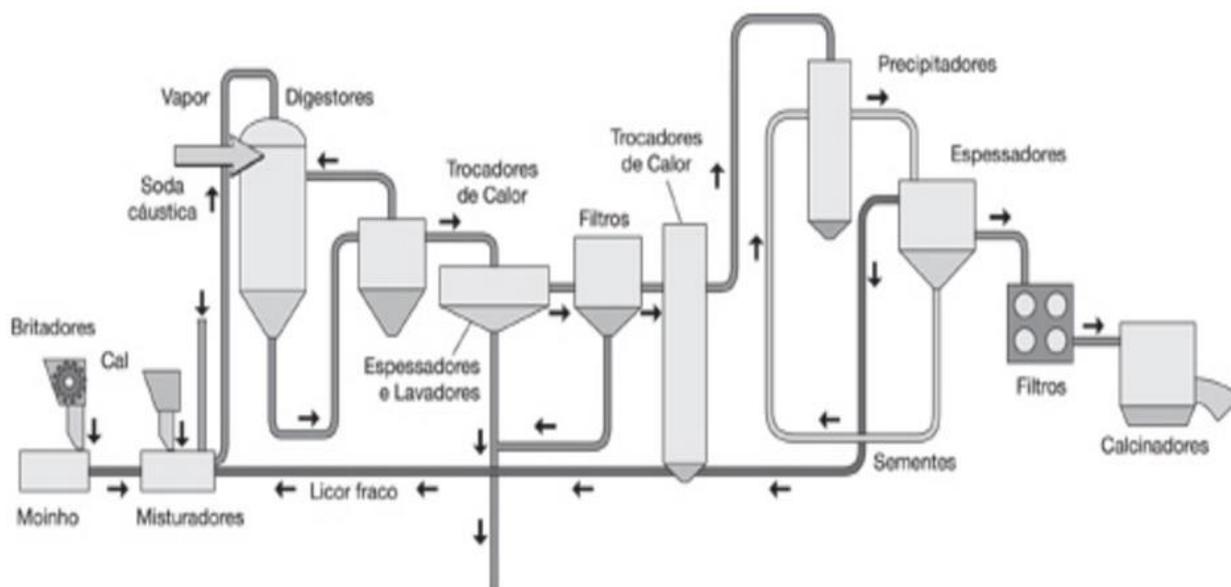


Figura 3 – Esquema do Processo Bayer
Fonte: Associação Brasileira do Alumínio (2007).

Na etapa da digestão ocorre a moagem da bauxita e sua dissolução em hidróxido de sódio (NaOH) sob temperatura e pressão pré-definidas. As condições utilizadas durante a digestão dependem da composição do minério, sendo a gibbsita o componente mais solúvel em NaOH. As condições, usualmente, empregadas em plantas comerciais são encontradas na Tabela 5.

Tabela 5 – Condições de digestão da bauxita em plantas comerciais.

Composição da Bauxita	Temperatura, °C	NaOH, g/L	Al ₂ O ₃ , g/L
Gibbsita	107	260	165
	142	105-145	90-130
Boehmita	197	150-250	120-160
	237	105-145	90-130
Diaspório	262	150-250	100-150

Fonte: Adaptado de Constantino, et al. (2002).

Durante a digestão, a maioria das espécies contendo alumínio é dissolvida formando o licor (rico em aluminato de sódio, Na[Al(OH)₄]) e a porção insolúvel é conhecida por lama vermelha (rica em óxido de ferro). Esta etapa ocorre de acordo com as Equações (1) e (2) (HIND, BHARGAVA e GROCOTT, 1999).

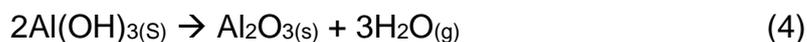


Durante a clarificação ocorre a separação entre a fase líquida (licor) e sólida (lama vermelha) pelos processos de espessamento e filtração. O espessamento consiste na decantação do material, no qual o resíduo originado na digestão é encaminhado para espessadores e lavadores para aumentar seu teor de sólidos. Comumente, são adicionados polímeros para induzir a floculação das partículas nos espessadores. Na filtração, o resíduo sólido é finalmente separado do licor (SILVA FILHO, ALVES e DA MOTTA, 2007).

A próxima fase é a precipitação que é composta pelo resfriamento da solução e pela adição de cristais de hidróxido de alumínio, o que fará com que a solução seja precipitada em gibbsita de acordo com a equação (3) (SILVA FILHO, ALVES e DA MOTTA, 2007; HIND, BHARGAVA e GROCOTT, 1999).



Na última etapa do Processo Bayer, a calcinação, a gibbsita é lavada para retirada de resíduo de licor e seca, sendo em seguida calcinada a aproximadamente 1000 °C, formando cristais de alumina pura como demonstrado na Equação (4).



Posteriormente, para produção de alumínio, o pó de alumina pura é encaminhado ao Processo Hall-Hérault, em que ocorre a redução eletrolítica do alumínio.

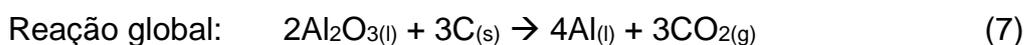
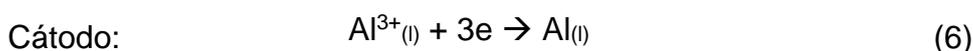
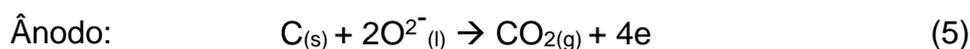
2.2.2 Processo Hall-Hérault

O processo Hall-Hérault foi criado em 1886 e começou a ser utilizado para produção comercial de alumínio metálico em 1889. Desde então, o processo continua basicamente o mesmo e produz toneladas de alumínio por ano (PRASAD, 2000).

O processo ocorre por eletrólise em cubas eletrolíticas (células) e, dependendo da capacidade de produção e tamanho das células, de 100 a 200 células podem ser conectadas em série para formar um sistema. O tamanho da célula é caracterizado pela corrente nominal e, normalmente, varia de 100 a 300 kA (WILKENING e WINKHAUS, 1989).

Como a alumina tem um alto ponto de fusão (2045 °C), ela é dissolvida em um banho de criolita fundida (Na_3AlF_6) e fluoreto de alumínio (AlF_3) para diminuir o ponto de fusão para aproximadamente 970 °C (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007; AUSETUTE, 2016).

A célula Hall-Hérault é composta pelo ânodo de carbono (polo positivo), em que ocorre a oxidação do carbono, e cátodo de carbono (polo negativo), em que ocorre a redução do alumínio, como mostrado nas Equações (5), (6) e (7)



O alumínio líquido é precipitado no fundo da cuba eletrolítica já na forma de alumínio primário. Em seguida, este alumínio é transferido para refusão através de cadinhos e encaminhados para produção de lingotes, placas e tarugos de metal primário (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2007). A Figura 4 mostra o esquema de uma célula Hall-Hérault industrial.

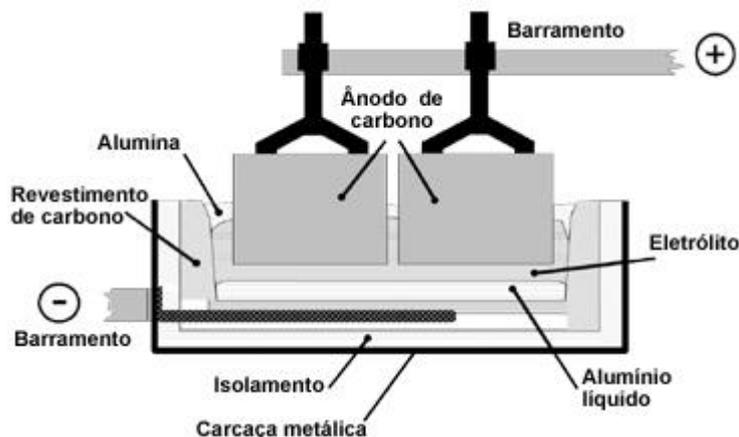


Figura 4 – Esquema de uma célula Hall-Héroult industrial
Fonte: Associação Brasileira do Alumínio (2007).

2.3 CORROSÃO EM ALUMÍNIO

Corrosão é, usualmente, definida como a deterioração de um material (geralmente metálico) por ação química ou eletroquímica do meio ambiente em conjunto ou não a esforços mecânicos. Tal deterioração proporciona alterações indesejáveis nas propriedades dos materiais, causando desgaste, variações químicas ou estruturais, o que o torna inadequado para utilização (GENTIL, 1996).

A corrosão é, em geral, um processo espontâneo e ocorre pela reação do material com o ambiente para retornar ao seu estado de menor energia, ou seja, ao estado que ele é encontrado na natureza (geralmente em forma de óxidos) (GENTIL, 1996).

Existem diversas formas de corrosão, sendo elas: uniforme, por placas, alveolar, por pite, intergranular, intragranular, filiforme, por esfoliação, gráfitica, dezincificação, empolamento pelo hidrogênio e em torno do cordão de solda.

O alumínio apresenta excelente resistência à corrosão, o que possibilita sua aplicação em diversos ambientes. Sua resistência à corrosão ocorre devido à sua passividade, ou seja, capacidade de formar uma película de óxido (Al_2O_3) sobre sua superfície, o que garante sua proteção contra corrosão e se caracteriza como uma barreira. Além disso, quando danificada, esse filme tem o poder de, na maioria dos ambientes, se refazer e continuar a proteger o metal. Porém, sob certas condições, esse filme protetor é danificado ou removido de tal maneira que o auto reparo não

ocorre e a corrosão então ocorre, caracterizando o alumínio como um metal de comportamento ativo-passivo (DAVIS, 1999; GHALI, 2010).

Pensando nesse comportamento, Pourbaix desenvolveu um método gráfico que relaciona potencial e pH e é utilizado para se prever em quais condições haverá corrosão, passividade ou imunidade. O Diagrama de Pourbaix é assim chamado para reações a 25 °C e sob 1 atm entre os metais e a água (GENTIL, 1996).

O Diagrama de Pourbaix para o alumínio está demonstrado na Figura 5.

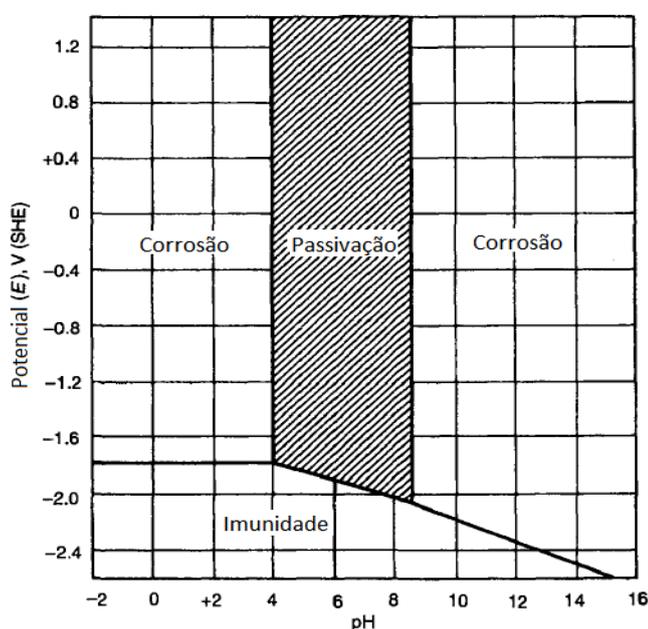


Figura 5 – Diagrama de Pourbaix para o alumínio
 Fonte: Adaptado de Davis (1999).

Como mostrado na Figura 5, o alumínio é passivo (protegido pelo filme de óxido) na faixa de pH entre 4 e 8,5. Entretanto, os limites dessa faixa podem variar de acordo com a temperatura, com a forma específica do filme presente e com a presença de substâncias que formam complexos solúveis ou sais insolúveis com alumínio (DAVIS, 1999).

Mesmo sendo bastante útil, o Diagrama de Pourbaix apresenta algumas limitações. O diagrama é baseado em reações entre metal puro imerso em água pura, sendo que, normalmente, a corrosão ocorre na presença de sais dissolvidos na água e outras reações podem ocorrer. Outro problema é que o diagrama é construído no equilíbrio e não leva em consideração estados dinâmicos, instáveis ou de transição.

Além disso, a corrosão pode ocorrer numa área dada como imunidade por conta de uma rápida mudança do meio corrosivo localizado na interface metal-solução (GHALI, 2010).

Outra forma de estudar a corrosão de acordo com o pH é pelo estudo da perda de massa, como mostrado na Figura 6.

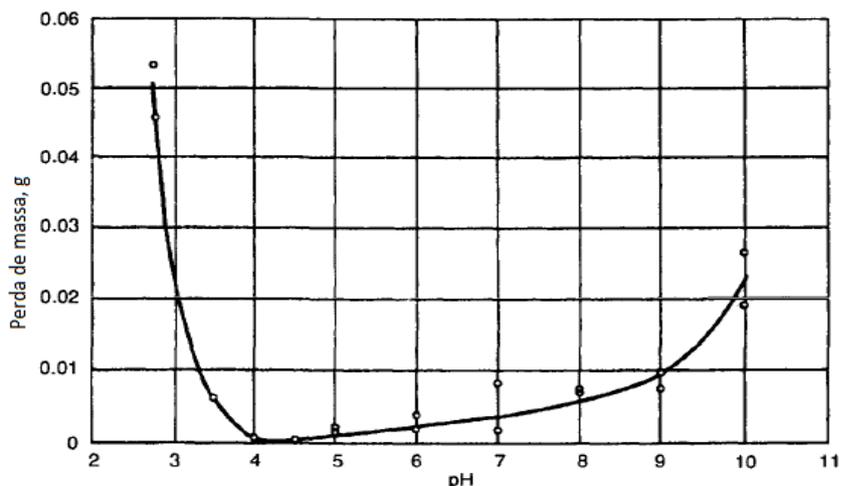


Figura 6 – Perda de massa da liga 3004-H14 exposta por 1 semana a água destilada em solução de diferentes pH utilizando HCl e NaOH
Fonte: Adaptado de Davis (1999).

A liga de alumínio AA1100 é, em geral, bastante resistente à exposição atmosférica (mesmo à chuva ácida), água destilada, gases (como hidrocarbonetos halogenados, com exceção de clorometano e bromometano) e ácidos graxos. Porém, ela não é resistente à ácidos como o ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido fluorídrico, ácido acético, entre outros. Outros meios corrosivos para AA1100 são meios alcalinos (ex. NaOH), água do mar, água com metais pesados, solventes clorados, álcoois anidros, mercúrio e fertilizantes (GHALI, 2010).

2.3.1 Fertilizantes Mistos (NPK)

Elementos utilizados em grande quantidade pelas plantas são chamados de macronutrientes, sendo eles formados por seis elementos: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Os três últimos elementos citados são facilmente

encontrados no solo e assimilados pelas plantas. Porém, isso não ocorre com nitrogênio, fósforo e potássio, impulsionando uma necessidade externa de suprimento que são os fertilizantes (SILVEROL, 2006). Os fertilizantes possuem, em geral, a maioria dos macronutrientes citados e também micronutrientes (zinco, cobre, ferro, manganês, molibdênio, boro, cloro, etc.), porém o nitrogênio, fósforo e potássio são encontrados em maiores quantidades.

Existem diferentes tipos de fertilizantes, sendo eles minerais e orgânicos. Dentro dos minerais, eles são subdivididos em nitrogenados, fosfatados e potássicos, sendo compostos essencialmente de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente. Uma outra classe são os fertilizantes mistos, que são uma combinação dos três últimos citados e são, usualmente, chamados de NPK.

Um dos problemas dos fertilizantes é a corrosão em metais durante o processo de produção, armazenagem e transporte. Alguns fertilizantes são mais corrosivos do que outros, especialmente se eles se decompõem ou reagem produzindo substâncias agressivas como amônia ou sulfeto de hidrogênio. Além disso, íons cloreto podem estar presentes (incluindo cloreto de potássio ou amônio). Nitrato de amônio e di-hidrogenofosfato de amônio são conhecidos por degradação de material por meio de hidrólise de ácidos, resultando na queda do pH (NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2016; OKI e ANAWE, 2015).

O fertilizante é mais agressivo em seu estado líquido, sendo que o fertilizante seco pode apresentar corrosão mínima. Entretanto, fertilizantes em seu estado sólido possuem natureza higroscópica e atraem umidade muito facilmente, tornando-se muito corrosivo. Para os fertilizantes se tornarem higroscópicos é necessário um percentual de umidade relativa, sendo que para nitrato de amônio esse percentual é de 60%, transformando o composto em líquido e altamente corrosivo. Além disso, o contato inicial com umidade causa um endurecimento do fertilizante, tornando-o mais abrasivo (OKI e ANAWE, 2015).

Os fertilizantes mistos possuem diferentes formulações quantitativas e NPK é um número indicativo disso. Por exemplo, um fertilizante NPK 10-4-8 possui 10% de nitrogênio, 4% de fósforo e 8% de potássio. A corrosividade do fertilizante é também dependente dessas formulações. Um estudo apontou que o aumento da razão entre fosfato e nitrogênio aumenta a corrosividade do fertilizante para alumínio, enquanto que o aumento de potássio tem o efeito contrário (HATFIELD, et al., 1958).

A Figura 7 mostra o fluxo de produção de fertilizantes NPK segundo a empresa Fosfertil, apresentando todas as matérias-primas necessárias para produção dos fertilizantes mistos.

A atmosfera da região de uma indústria de fertilizantes por si só já é bastante agressiva pela liberação de fumaça contendo NH_4Cl , NH_3 , P_2O_5 e gases como o HF, HCl, NH_3 , SO_3 e SO_2 (FELSKE, et al., 2004).

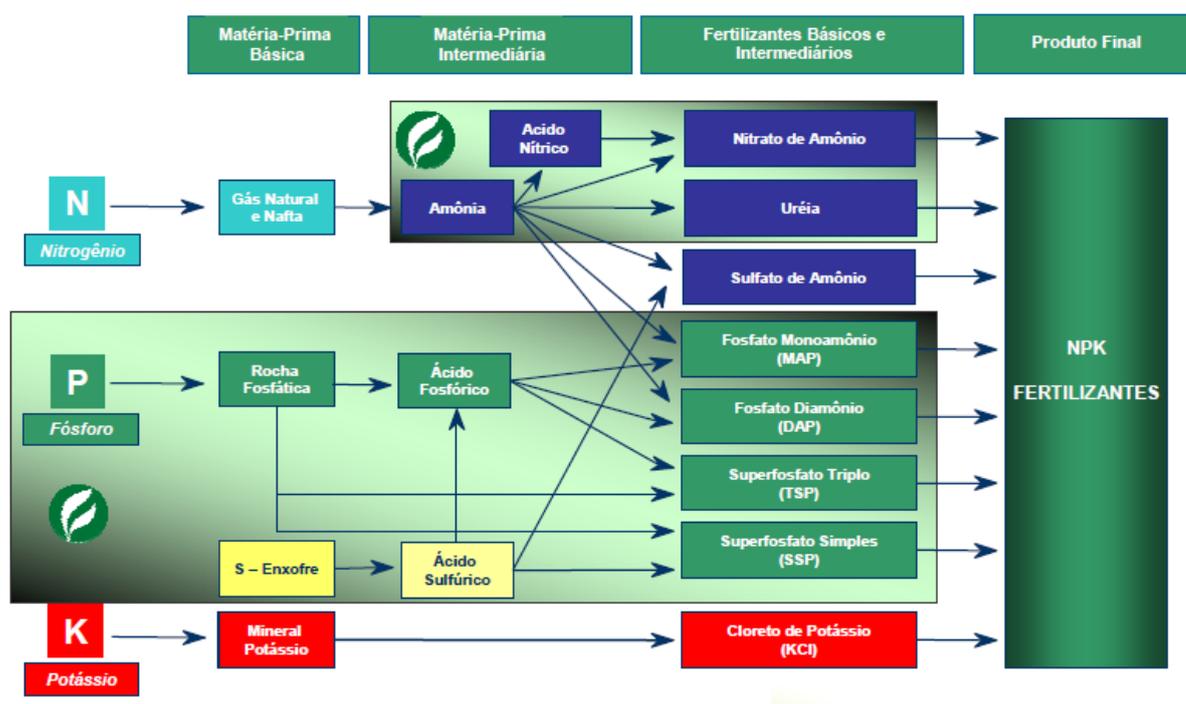


Figura 7 – Fluxo de produção de fertilizantes NPK segundo empresa de fertilizantes Fosfertil. Fonte: Adaptado de Fosfertil (2010)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado por meio de testes de imersão para o estudo da corrosão.

Foram utilizadas chapas de liga de alumínio AA1100 (H14) da Novelis, com composição química segundo apresentado na Tabela 3 e propriedades mecânicas conforme Tabela 6, sendo que H1 indica que o material foi somente encruado (sem recozimento complementar) e o segundo dígito 4 indica o grau de encruamento.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas típicas a temperatura ambiente para liga de alumínio 1100 com têmpera H14.

Propriedades	Valores
Resistência a tração (MPa)	124
Limite de escoamento (MPa)	117
Elongação (1/16 pol de espessura)	9
Elongação (1/2 pol de espessura)	20
Dureza (HB)	32
Resistência ao cisalhamento	76
Limite à fadiga	48

Fonte: Nunes, et al. (1992)

A composição dos fertilizantes mistos utilizados foram 10-10-10, 4-14-8 e 15-5-5, todos da marca Dimy. A Tabela 7 mostra a composição de cada fertilizante NPK utilizado de acordo com informações das embalagens. Essas composições foram escolhidas por serem as formulações mais comuns e facilmente encontradas, sendo utilizadas para crescimento de flores, hortaliças, frutíferas, plantio de vegetais e preparação do solo.

Tabela 7 – Composição dos fertilizantes NPK utilizados.

Formulação	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
10-10-10	10% (110g/L)	10% (191 g/L)	10% (228 g/L)
4-14-8	4% (28 g/L)	14% (260 g/L)	8% (130 g/L)
15-5-5	15% (54 g/L)	5% (16 g/L)	5% (22 g/L)

Fonte: Autoria própria

Os outros materiais utilizados foram:

- Serra – Stanley;
- Cortadeira eletrônica – Fortel (CF III);
- Balança analítica – BioScale (2204);
- Lavadora ultrassônica – Sunders (Soniclean 2);
- Medidor de pH portátil – TecnoPON (MPA 210P);
- Banho maria com circulação – Solab (SL 154);
- Microscópio óptico – Altion;
- Paquímetro digital – Insize;
- Lixadeira e Politriz – Fortel (PLF);
- Lixas;
- Dessecador;
- Microscópio eletrônico de varredura – FEI Inspect S50;
- Espectrômetro de energia dispersiva de raios X.

3.1 TESTES DE IMERSÃO

Para os testes de imersão foram utilizadas 24 amostras de dimensões $13 \pm 2,0$ mm, $25 \pm 1,5$ mm e $3 \pm 0,1$ mm.

As amostras foram lixadas antes do teste para garantir uma superfície regular utilizando lixas número 120 e 220, adaptado da norma ASTM G31-72.

Após o lixamento, as amostras foram limpas em água, seguido de banho ultrassônico em acetona. Depois de secas, as amostras foram pesadas em uma balança analítica e colocadas em um dessecador até seu uso.

Os testes de imersão foram do tipo “teste de intervalo planejado” pois a corrosão em alumínio não é linear, visto que no início da exposição existirá uma alta taxa de corrosão até a formação da camada passiva, o que diminui a taxa de corrosão (sendo que esta poderá aumentar novamente se a camada for rompida). O resultado obtido com teste de imersão simples não identifica o comportamento corrosivo ao longo do tempo exposto. Sendo assim, com o teste de intervalo planejado é possível se obter a taxa de corrosão para cada intervalo de tempo, bem como identificar se o

material se tornou mais susceptível ou não à corrosão ao longo do tempo e determina se o ambiente se tornou mais ou menos severo com o tempo (BABOIAN, et al., 2005). O teste de intervalo planejado é explicado na Figura 8 e sua interpretação está explicada na Tabela 8 e Tabela 9, sendo esta última apenas a combinação das interpretações.

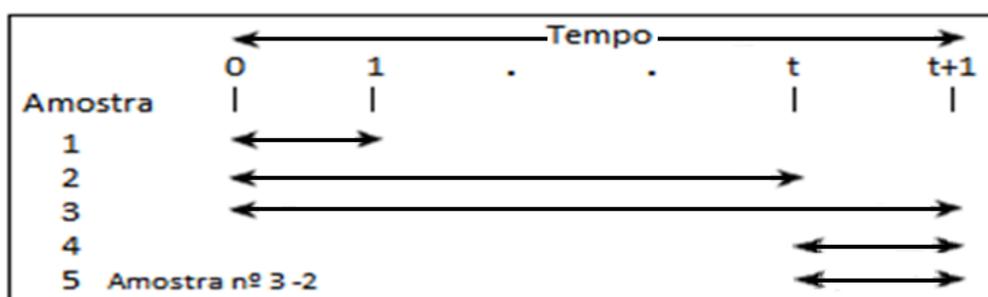


Figura 8 – Teste de intervalo planejado
Fonte: Adaptado de Baboian, et al. (2005)

De acordo com a Tabela 8, a corrosividade do líquido em função do tempo é estudada a partir das amostras 1 e 4, pois ambas são imersas pelo mesmo período de tempo, porém em momentos diferentes, o que possibilita a avaliação do meio com o tempo. Já a susceptibilidade do metal à corrosão em função do tempo é estudada comparando as amostras 4 e 5, pois ambas correspondem ao mesmo tempo em imersão, porém representam diferentes situações, já que a amostra 4 não passou pelas transformações que podem ter ocorrido no metal devido ao tempo de imersão anterior.

Tabela 8 – Interpretação do teste de intervalo planejado

		Critério (penetração da corrosão na amostra)
Corrosividade do líquido	Sem mudança	1 = 4
	Diminui	1 > 4
	Aumenta	1 < 4
Susceptibilidade do metal à corrosão	Sem mudança	4 = 5
	Diminui	4 > 5
	Aumenta	4 < 5

Fonte: Adaptado de Baboian, et al. (2005)

Tabela 9 – Combinações de interpretações do teste de intervalo planejado

Corrosividade do líquido	Susceptibilidade do metal à corrosão	Critério (penetração da corrosão na amostra)
Sem mudança	Sem mudança	$1 = 4 = 5$
Sem mudança	Diminui	$1 = 4 > 5$
Sem mudança	Aumenta	$1 = 4 < 5$
Diminui	Sem mudança	$1 > 4 = 5$
Diminui	Diminui	$1 > 4 > 5$
Diminui	Aumenta	$1 > 4 < 5$
Aumenta	Sem mudança	$1 < 4 = 5$
Aumenta	Diminui	$1 < 4 > 5$
Aumenta	Aumenta	$1 < 4 < 5$

Fonte: Adaptado de Baboian, et al. (2005)

O intervalo de tempo de exposição das amostras ocorreu de acordo com a Tabela 10. A amostra 5 é simplesmente um cálculo de subtração entre os dados das amostras 3 e 2. Além disso, a penetração em mm (equação (8)) e a taxa de corrosão em mm/ano (equação (9)) foram calculadas.

Tabela 10 – Planejamento das amostras por semana

Amostra	Início (semana)	Fim (semana)	Tempo total (semanas)
1	0	1	1
2	0	4	4
3	0	5	5
4	4	5	1

Fonte: Autoria própria

$$\text{Penetração} = \frac{(\text{perda de massa em mg})}{(\text{área em mm}^2)(\text{densidade em } \frac{\text{g}}{\text{cm}^3})} \quad (8)$$

$$\text{Taxa de corrosão aparente} = \frac{(\text{penetração em mm})365}{\text{tempo em dias}} \quad (9)$$

Segundo Baboian, et al. (2005, p. 141), para testes em condições ambientes, a temperatura utilizada deve ser a maior possível considerando meses de verão no qual as condições de armazenamento e transporte do produto podem ser tão altas quanto 55 °C. Pensando nisso, os testes foram realizados a temperatura ambiente e a 50 °C (aquecidas em banho maria com circulação) para comparação. A Figura 9 mostra o aparato utilizado para o ensaio de imersão, no qual cada mostra foi colocada em um recipiente diferente para evitar contato entre elas e suspensa por uma linha para evitar contato com as superfícies do recipiente.



Figura 9 – Aparato utilizado para ensaio de imersão.
Fonte: Autoria própria.

Para pesagem de cada amostra, após a exposição ao processo corrosivo, foi utilizada limpeza mecânica da amostra. Após a análise por EDS, foi realizada a limpeza química de cada amostra com ácido nítrico (65%) por 2 a 3 minutos, seguindo a norma da ASTM G1-90, após a qual as amostras foram novamente pesadas.

A balança utilizada para pesagem foi uma balança analítica com precisão de quatro casas e erro de $\pm 0,2$ mg.

A amostra que obteve maior perda da massa (amostra 4 da composição 4-14-8 a 50 °C) teve sua seção transversal exposta por meio de corte em retífica. A seção transversal da amostra foi lixada nas lixas 220, 400, 600, 1200 e polida utilizando suspensão de alumina ($1\mu\text{m}$).

A Tabela 11 apresenta os critérios de resistência relativa do alumínio e suas ligas à corrosão segundo a taxa de corrosão em $\text{g/m}^2/\text{dia}$ e foi utilizada para comparação com o resultados obtidos pelos testes de imersão.

Tabela 11 – Resistência relativa do alumínio e suas ligas à corrosão

Taxa de Corrosão ($\text{g/m}^2/\text{dia}$)	Resistência à corrosão
<0,8	Resistente
0,8 a 8	Razoavelmente resistente
8 a 24	Não resistente
>72	Não indicado

Fonte: Adaptado de Gentil (1996)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mostrado na seção anterior (seção 3), os testes foram realizados por meio de três composições de fertilizantes mistos (10-10-10, 4-14-8 e 15-5-5) e duas temperaturas (50 °C e ambiente), totalizando 24 amostras.

Os dados obtidos para cada amostra estão dispostos nas tabelas de 14 a 19 no Apêndice A e estão agrupados por composição de fertilizante e temperatura de ensaio. É importante lembrar que a amostra 5 não é uma amostra fisicamente existente, pois ela é apenas a diferença entre os dados obtidos para as amostras 3 e 2, sendo utilizada para se analisar a susceptibilidade do metal a corrosão em função do tempo.

Uma vez que cada amostra estava em um recipiente separado (para evitar influência na taxa de corrosão pelo contato entre as amostras), a amostra 4 de cada composição foi imersa no fertilizante presente no recipiente da amostra 2 de cada composição, já que a amostra 2 foi retirada da imersão no mesmo dia que a amostra 4 foi colocada, a fim de se avaliar a corrosividade do meio em função do tempo.

A maioria das amostras apresentaram coloração amarelada após os testes, como pode ser visto pela Figura 10, o que indica uma possível ocorrência de corrosão e/ou adsorção física.

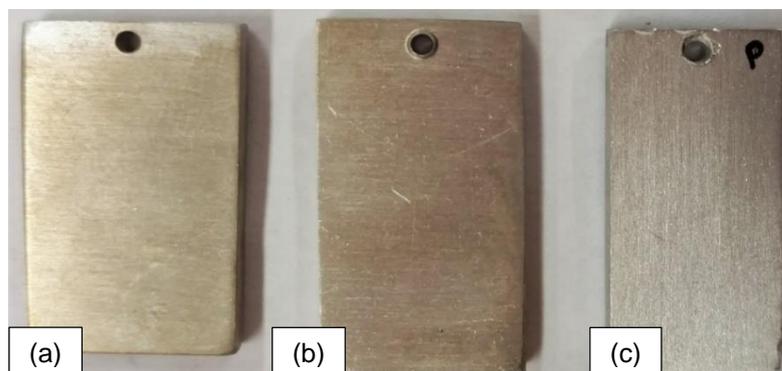


Figura 10 – Mudança de coloração em duas amostras (a e b) após o testes em comparação com amostra padrão (c).

A Figura 11 mostra os valores de penetração de corrosão obtidos por amostra durante os ensaios de acordo com as três composições utilizadas de fertilizantes mistos e temperatura de ensaio utilizada (50 °C e ambiente).

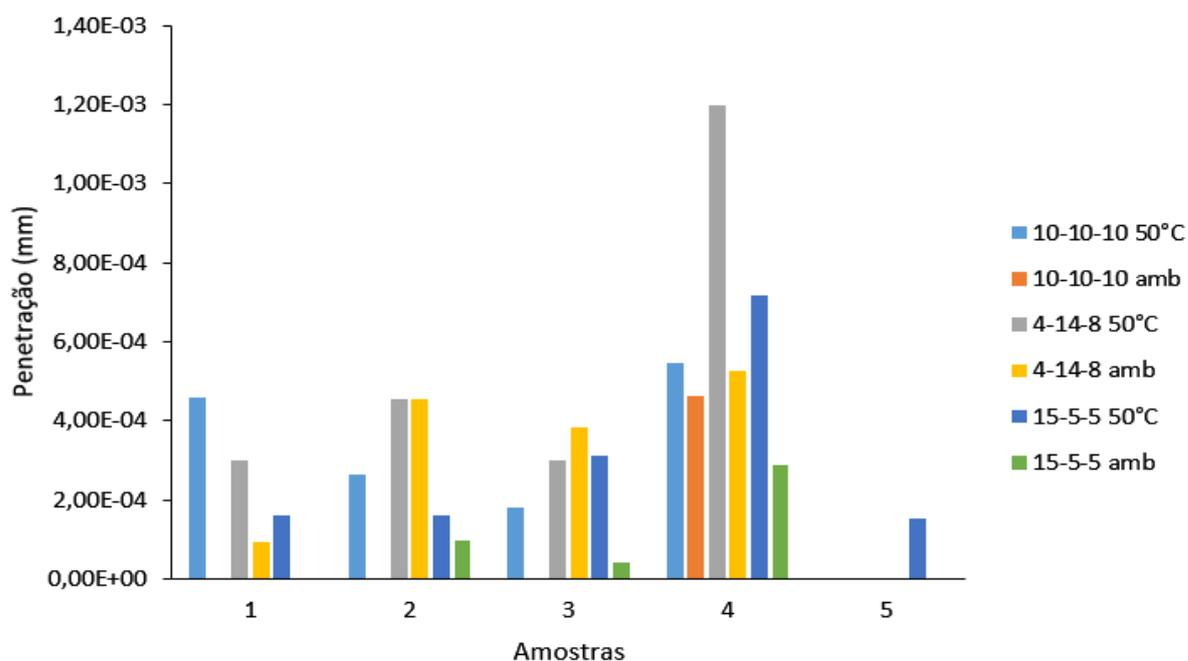


Figura 11 – Penetração de corrosão obtida por amostra durante ensaio em fertilizantes mistos a 50 °C e temperatura ambiente.

Como já explicado (seção 3.1), a amostra 4 foi a amostra utilizada como parâmetro para estudo da corrosividade do meio em função do tempo, uma vez que esta foi imersa nos fertilizantes na última semana de testes. Por este motivo, essa amostra foi utilizada para avaliar a influência de fosfato/nitrogênio e potássio/nitrogênio na corrosividade.

O fertilizante 4-14-8 apresenta uma razão entre fosfato e nitrogênio de 3,5 (14/4) e pode-se observar na Figura 11 que esta composição a 50 °C foi a que apresentou maior corrosão, seguida pela composição 15-5-5 de razão 0,33 (5/15) e 10-10-10 de razão 1 (10/10). Entretanto, à temperatura ambiente a ordem de corrosividade foi (do maior para o menor): 4-14-8, 10-10-10 e 15-5-5. Dentre essas três composições, a 4-14-8 se apresenta como a mais corrosiva pelos dados obtidos. Porém, entre as composições 10-10-10 e 15-5-5 não é possível se inferir qual é a mais corrosivo.

Segundo Hatfield, et al. (1958, p. 525), e como citado na seção 2.3.1, os fertilizantes mistos com maiores razões (em peso) entre fosfato e nitrogênio (maior do que três), aparentemente, apresentam maior corrosividade do que fertilizantes com baixos teores de fosfato. Além disso, ainda segundo Hatfield, et al. (1958, p.526), fertilizantes mistos com razão maior entre potássio e nitrogênio apresentam menor corrosividade, pois o potássio aparentemente protege o alumínio.

Ao se levar em consideração a razão de potássio para nitrogênio é possível analisar que as composições 10-10-10 e 15-5-5 apresentam, respectivamente, razão 1 e razão 0,33, ou seja, a mesma razão de fosfato para nitrogênio. Porém, como pode ser visto na Tabela 7, a concentração de K_2O é maior do que de P_2O_5 , e isso possivelmente pode contribuir para maior proteção do alumínio. O mecanismo pelo qual isso ocorre não é conhecido. Porém, alguns estudos com inibidores contendo potássio, como K_2CrO_4 e KIO_3 , citam que essas moléculas podem ser adsorvidas na superfície do alumínio, o que limita a dissolução do produto corrosivo e bloqueia os pontos de corrosão, diminuindo, portanto, a perda de massa (MAGHRABY, 2009; UWIRINGIYIMANA, et al., 2016)

Utilizando os critérios presentes na Tabela 9 sobre interpretação do teste de intervalo planejado, é possível observar que para todas as formulações e ambas as temperaturas, a penetração nas amostras 1, 4 e 5 ocorre da seguinte forma: $1 < 4 > 5$. Dessa forma, as interpretações permitem afirmar que a corrosividade do meio em função do tempo aumenta ($1 < 4$), enquanto que a susceptibilidade da liga de alumínio A1100 à corrosão em função do tempo diminui ($4 > 5$). A corrosividade do meio pode estar aumentando pela reação química entre componentes do meio, gerando produtos corrosivos. Após a retirada das amostras do meio, foi notado a formação de produtos insolúveis brancos e de aparência arenosa, que se depositaram especialmente no fundo do recipiente e na linha utilizada para deixar a amostra suspensa.

A diminuição da susceptibilidade à corrosão do material está, provavelmente, ligada a regeneração da camada passiva, apresentando o comportamento típico do alumínio em corrosão (ativo-passivo), como explicitado anteriormente (seção 2.1).

A Tabela 12 mostra os valores de pH medidos antes do ensaio (inicial) e os valores de pH medidos após cada ensaio, a 50 °C e a temperatura ambiente. Como demonstrado na Tabela 12, os valores de pH das composições de fertilizantes estão entre 4 e 8,5, zona do diagrama de Pourbaix (Figura 5) que corresponde a passivação, de forma que o metal apresentará pouca ou nenhuma corrosão, como explicitado no

exemplo da Figura 6, o que condiz com os resultados obtidos. Porém, o diagrama de Pourbaix, como explicado no tópico 2.3, representa o comportamento do alumínio puro, a 25°C, sob 1 atm em água, sendo assim, para o material e condições aqui estudados essas zonas podem sofrer modificações, uma vez que tais linhas são modificadas de acordo com temperatura e formação de produtos de corrosão. Além disso, mesmo na região prevista como imunidade pode ocorrer corrosão se a interface metal-solução sofrer uma mudança brusca. Vale ressaltar também que os ensaios realizados visaram reproduzir uma simulação da realidade em menor tempo, porém a falha real (caçamba do caminhão) demorou 2 anos para ocorrer, enquanto que os testes foram realizados em 5 semanas.

Tabela 12 – Valores de pH para as composições de fertilizantes antes do ensaio (inicial) e depois do ensaio.

	10-10-10 50 °C	10-10-10 amb	4-14-8 50°C	4-14-8 amb	15-5-5 50°C	15-5-5 amb
Inicial		4,59		4,53		5,43
Amostra 1	5,1	4,64	4,94	4,51	6,2	5,3
Amostra 2/4	5,82	4,63	6,61	4,62	6,80	5,58
Amostra 3	6,5	4,74	6,15	4,65	6,57	5,46

As figuras 12, 13 e 14 mostram a taxa de corrosão média (mm/ano) para cada amostra para os meios de composição 10-10-10, 4-14-8 e 15-5-5. Como pode ser analisado por essas figuras, no geral, os testes realizados a 50 °C apresentaram maior taxa corrosão do que os testes realizados a temperatura ambiente, comportamento esperado uma vez que as reações químicas são mais rápidas quanto mais alta a temperatura, ocorrendo o mesmo com a corrosão. Segundo Baboian, et al. (2005, p.550), a 50 °C a taxa de corrosão pode ser até quatro vezes mais rápida do que a 25°C. Além disso, a mudança de pH observada na Tabela 12 para temperatura de 50 °C (em relação ao pH inicial) sugere que houve reações químicas termicamente ativadas entre os compostos dos fertilizantes.

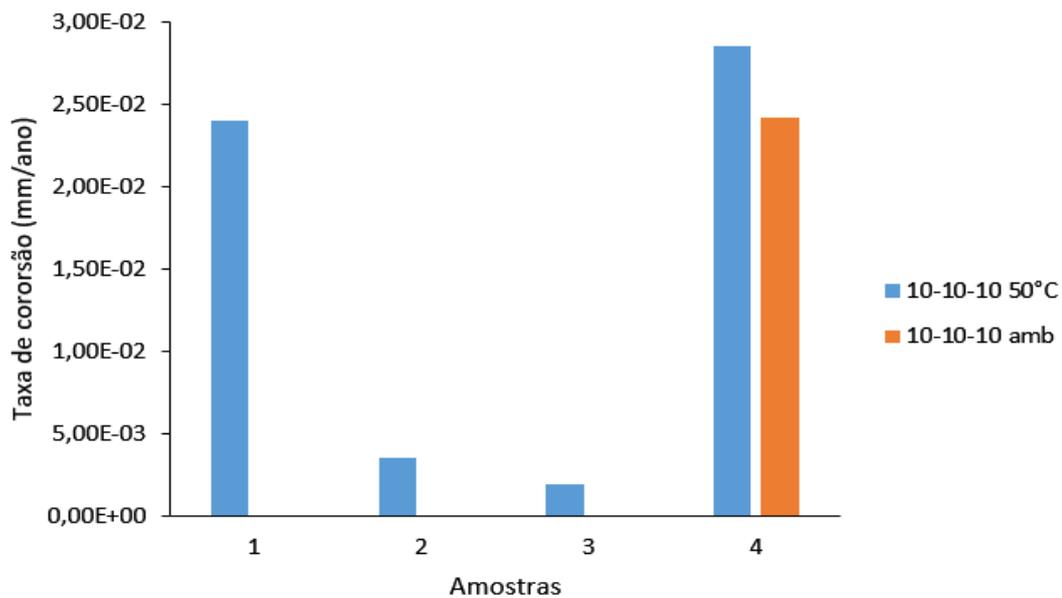


Figura 12 – Taxa de corrosão obtida por amostra durante ensaio em fertilizante misto 10-10-10 a 50 °C e temperatura ambiente.

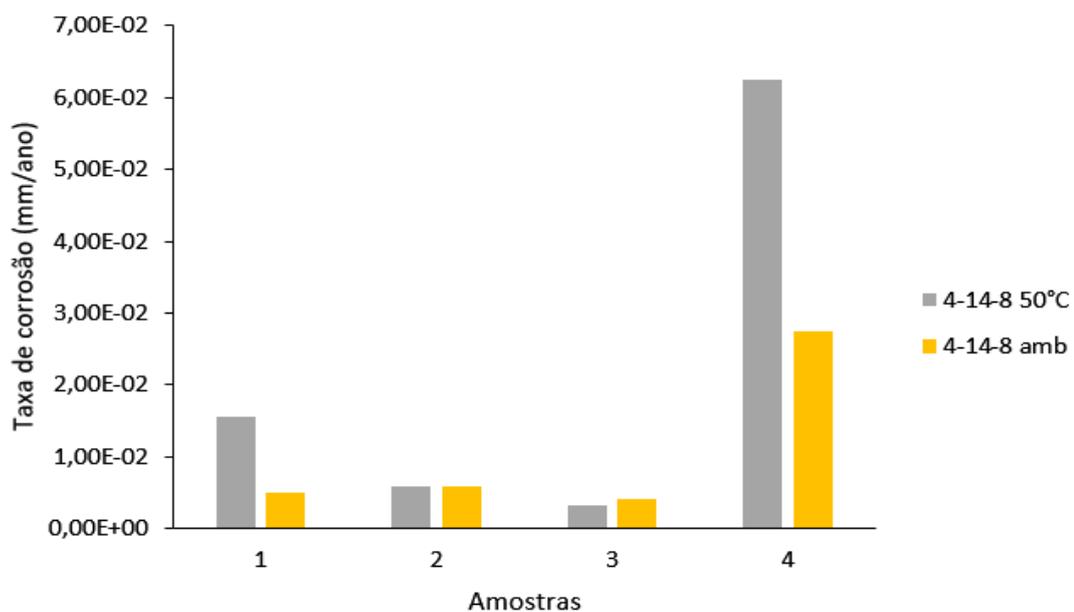


Figura 13 – Taxa de corrosão obtida por amostra durante ensaio em fertilizante misto 4-14-8 a 50 °C e temperatura ambiente.

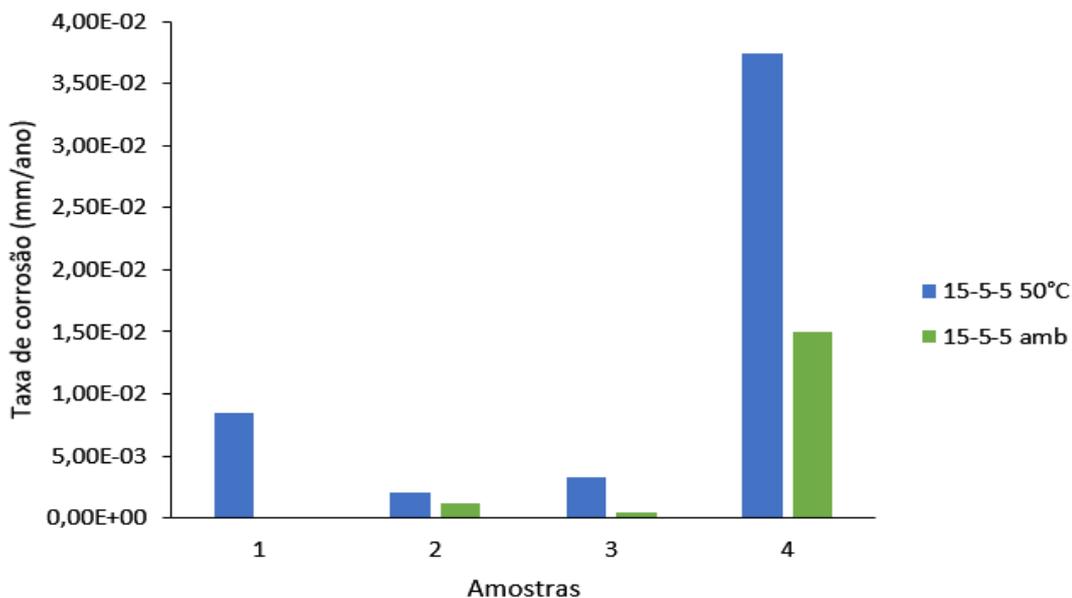


Figura 14 – Taxa de corrosão obtida por amostra durante ensaio em fertilizante misto 15-5-5 a 50 °C e temperatura ambiente.

A Figura 15 mostra a relação entre a taxa de corrosão média (mm/ano) e o tempo de teste para composição de fertilizante misto 10-10-10. Acredita-se que a 50 °C a degradação inicial da camada passiva do alumínio foi facilitada pelas condições mais agressivas do meio, tendo uma maior taxa de corrosão. Com o passar do tempo, essa taxa de corrosão foi caindo pela regeneração da camada passiva, uma vez que, como já mencionado, o material encontra-se em sua zona de passivação, evidenciando a diminuição da susceptibilidade do alumínio à corrosão com o tempo nesses meios estudados. Já à temperatura ambiente, provavelmente as condições do meio não foram suficientes para a degradação da camada passiva num primeiro momento por conta da cinética de corrosão. Porém, como a corrosividade do meio aumenta pela provável formação de produtos de corrosão, e em algum momento entre a semana 4 e semana 5 essa camada pode ser degradada, o que se confirma pela taxa de corrosão apresentada pela amostra 4 (Figura 12), que foi imersa em um momento de maior corrosividade do meio.

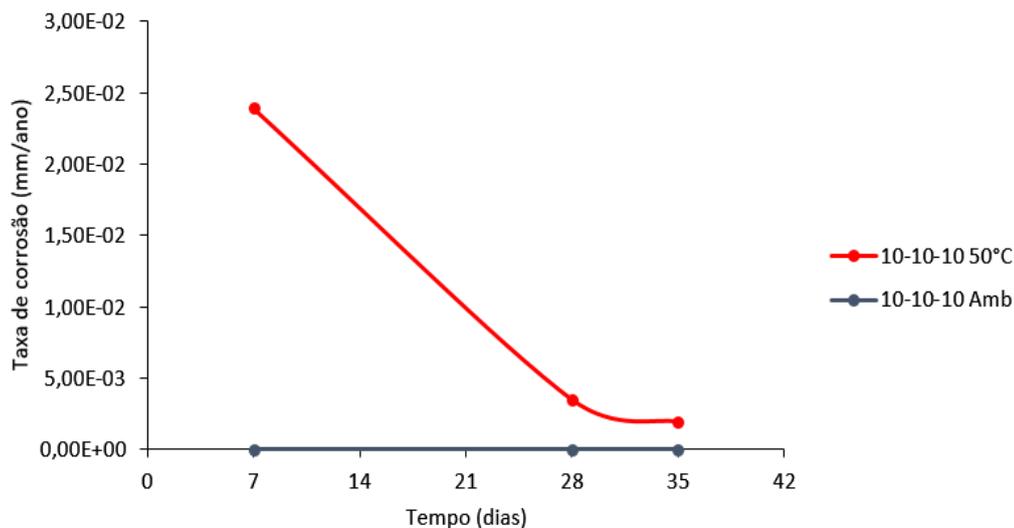


Figura 15 – Taxa de corrosão por tempo para composição 10-10-10 a 50 °C e a temperatura ambiente.

A Figura 16 mostra a taxa de corrosão média em função do tempo para composição 4-14-8. Novamente, é verificado que os testes a 50 °C apresentaram uma taxa de corrosão mais alta e que diminui com o tempo, comportamento que ocorreu, provavelmente, pelo mesmo motivo apontado para composição 10-10-10. Já em temperatura ambiente, observa-se que a taxa de corrosão se inicia mais baixa pelas condições menos agressivas do meio (temperatura mais baixa), subindo por conta do aumento da corrosividade do meio, e voltando a cair, possivelmente pela regeneração da camada passiva.

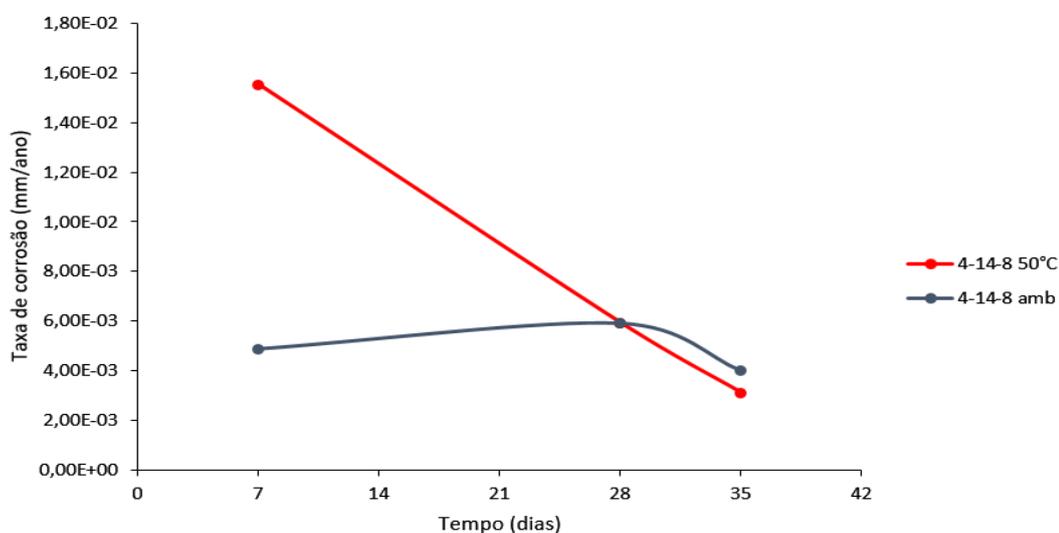


Figura 16 – Taxa de corrosão por tempo para composição 4-14-8 a 50 °C e a temperatura ambiente.

A Figura 17 mostra taxa de corrosão por tempo para testes na composição 15-5-5. A 50 °C verifica-se uma taxa de corrosão maior no início (ruptura da camada passiva), que diminui com o tempo (regeneração da camada passiva) e volta a crescer (formação de produtos de corrosão, aumentando corrosividade do meio). À temperatura ambiente, acredita-se que as condições do meio não foram suficientes para degradação da camada passiva inicialmente por conta da cinética de corrosão, que faz com que a temperaturas mais baixas as reações químicas sejam mais lentas. Porém, tendo a formação de produtos de corrosão, a camada passiva pôde ser rompida (entre 7 e 28 dias) e regenerada logo após (entre 28 e 35 dias).

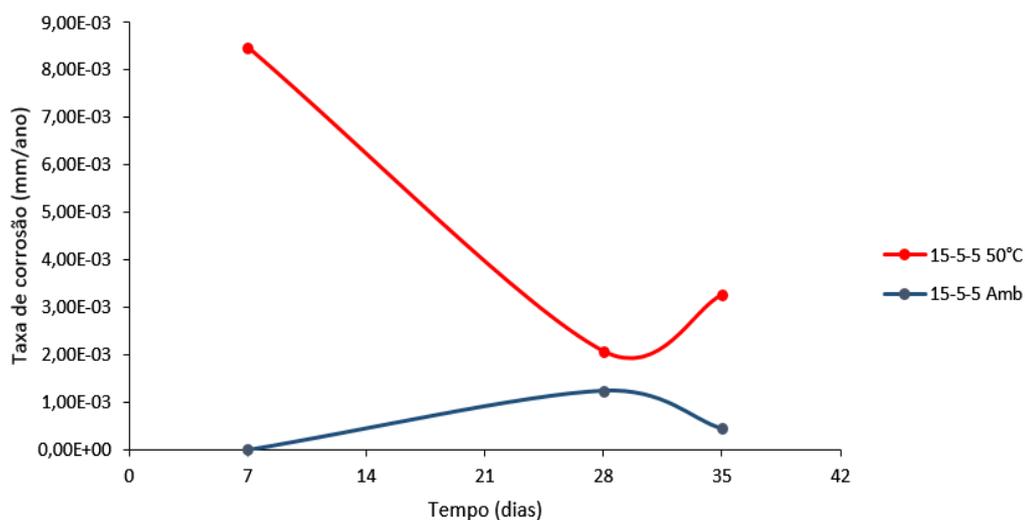


Figura 17 – Taxa de corrosão por tempo para composição 15-5-5 a 50 °C e a temperatura ambiente.

Foi realizada microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas amostras 3 e 4 de cada composição e também em uma amostra padrão (não ensaiada). Algumas micrografias são mostradas a seguir.

A Figura 18 mostra as micrografias da amostra padrão.

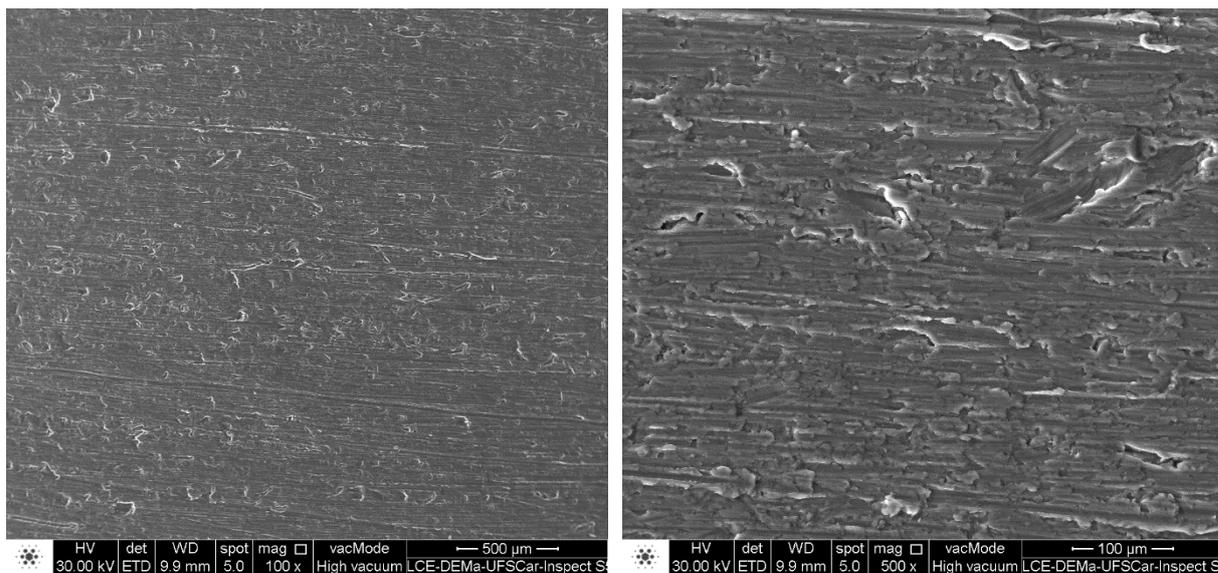


Figura 18 – Micrografias da superfície da amostra padrão a 100x e 500x realizado por MEV.

As figuras a seguir (Figura 19 a Figura 24) mostram as micrografias de algumas amostras, e como pode ser analisada por comparação com as micrografias da amostra padrão (Figura 18) as micrografias estão de acordo com os resultados obtidos de pouca perda de massa, mostrando que a liga de alumínio AA1100 é bastante resistente aos fertilizantes utilizados e não pôde ser encontrado características de corrosão pronunciadas.

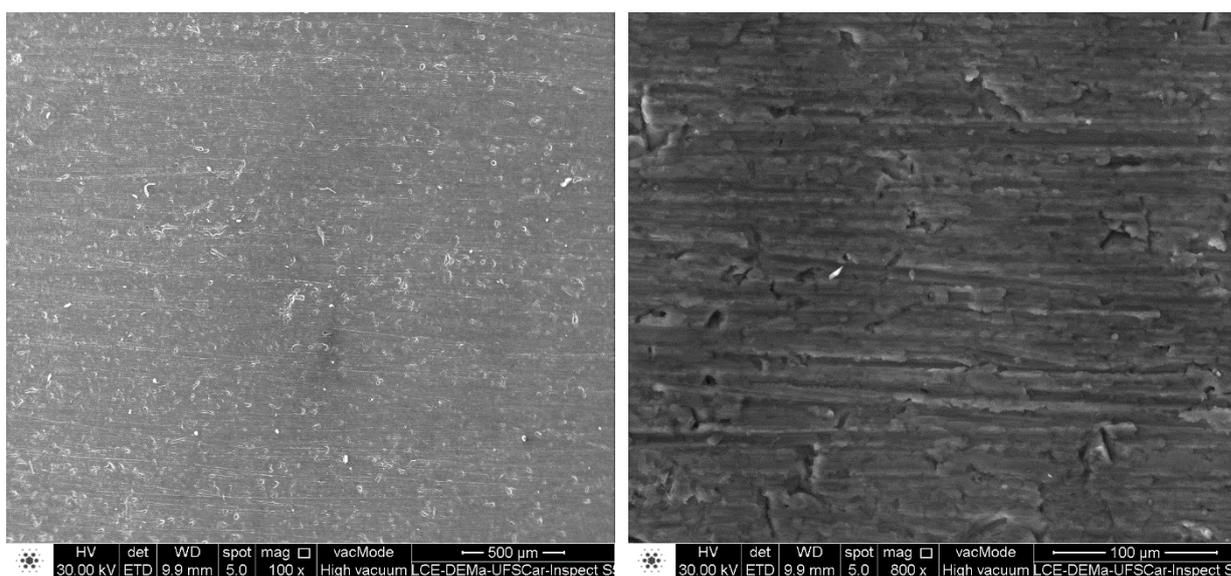


Figura 19 – Micrografias da superfície da amostra 3 para composição 4-14-8 a 50 °C (100x e 800x).

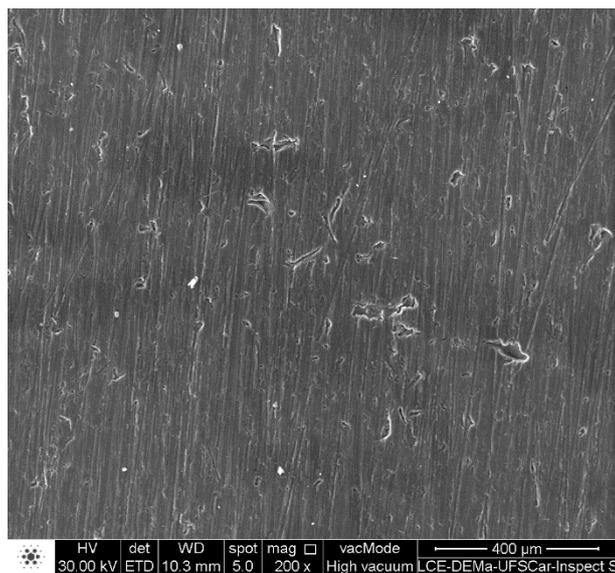


Figura 20 – Micrografia da superfície da amostra 3 para composição 15-5-5 a 50 °C.

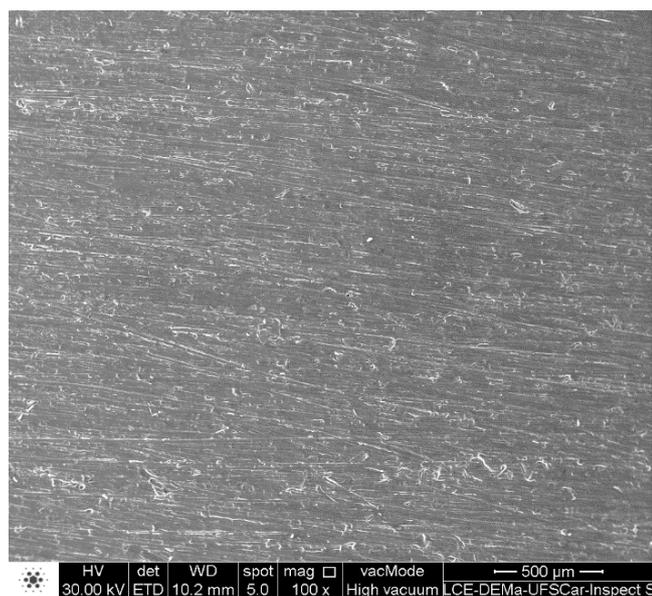


Figura 21 – Micrografia da superfície da amostra 3 para composição 10-10-10 a 50 °C.

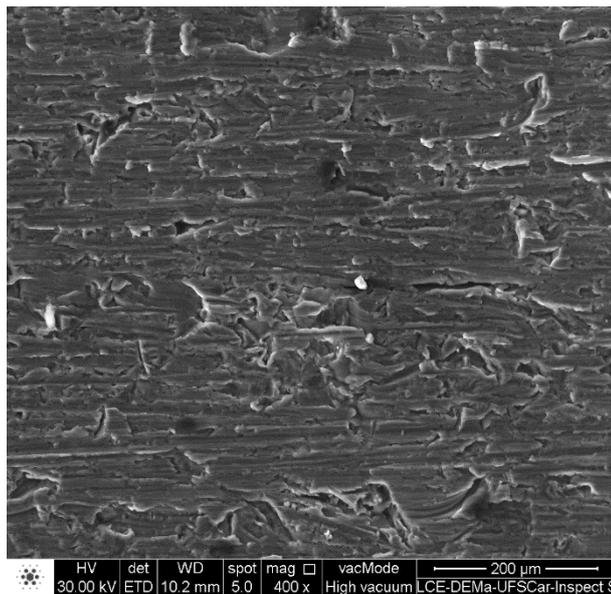


Figura 22 – Micrografia da superfície da amostra 4 para composição 10-10-10 a 50 °C.

A amostra 4 da composição 4-14-8 ensaiada a 50 °C foi a que obteve maior perda de massa (2,6 mg) e teve sua seção transversal cortada e polida para análise (Figura 23). Porém, não foram encontradas características relevantes de corrosão.

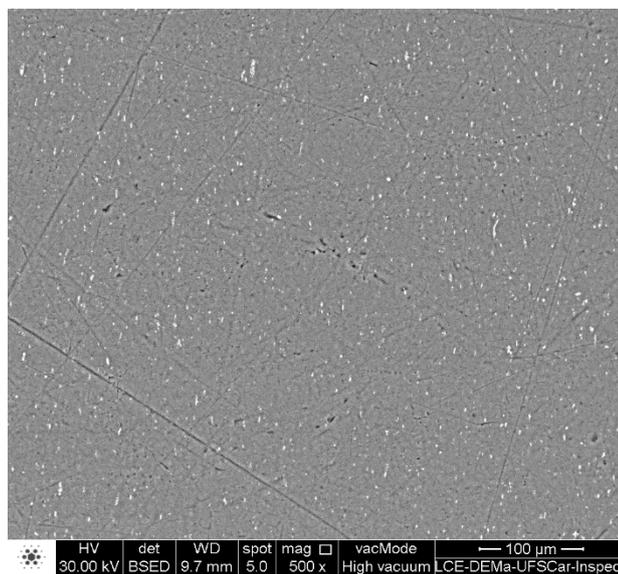


Figura 23 – Micrografia da seção transversal da amostra 4 da composição 4-14-8 a 50°C.

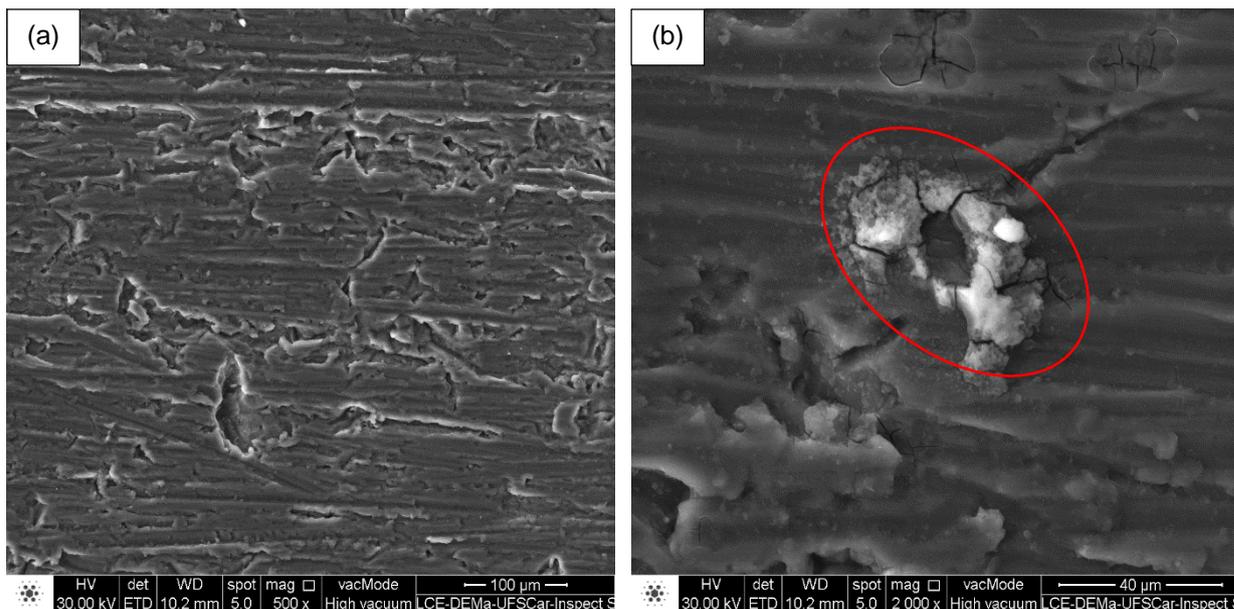


Figura 24 – Micrografia da superfície da amostra 4 para composição 15-5-5 a 50 °C.

Em algumas amostras foi possível encontrar regiões, como a da Figura 24 (b), com elementos que parecem ser incrustações. Realizando análise dessa região por EDS, obteve-se o espectro da Figura 25. Por esse espectro pode-se constatar a presença de fósforo e potássio na superfície do material. Não se pode inferir se isso seria um produto de corrosão ou impurezas oriundas do próprio agente corrosivo, pois análises mais superficiais como, por exemplo, XPS deveriam ser utilizadas para tal caracterização. De acordo com Hatfield, et al. (1958, p. 526), em seus testes foram encontrados produtos de corrosão esbranquiçados e de aspecto arenoso, descrição que se encaixa com o produto encontrado nos testes deste trabalho, como citado previamente nesta seção. O produto de corrosão desta referência foi identificado como fosfato de amônio-alumínio com partes de amônio substituídas por potássio.

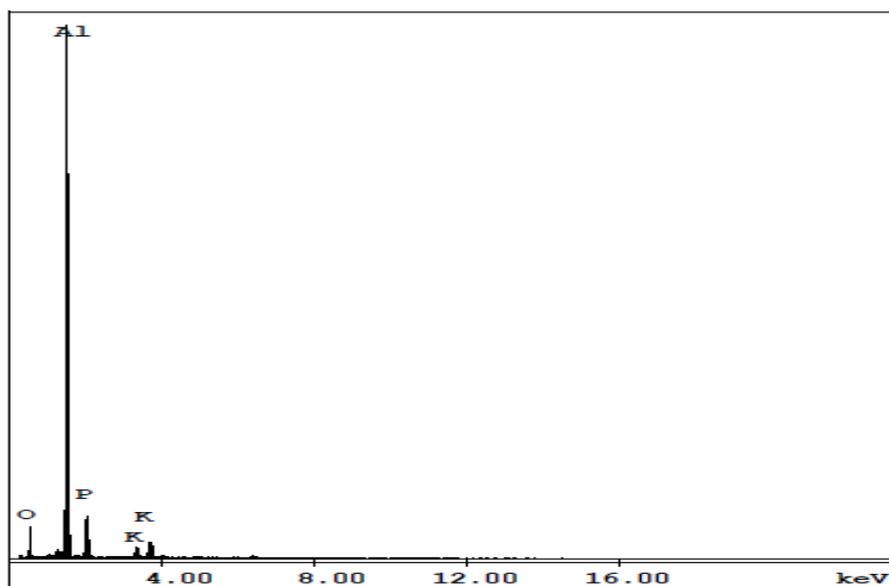


Figura 25 – Espectro de raio-x por dispersão de energia obtido da região circulada na Figura 24 (amostra 4 da composição 15-5-5 a 50 °C).

A análise por EDS foi realizada em outras seções dessas amostras, porém os elementos encontrados foram os já esperados de acordo com a Tabela 3, como: alumínio, cobre, zinco, ferro e os já mostrados fósforo e potássio.

Como pode ser analisado, cada amostra apresentou penetração de corrosão muito baixa (0 a $1,20 \times 10^{-3}$ mm), evidenciado pelas baixas perdas de massa (0 a $2,6$ mg) e, portanto, baixas taxas de corrosão (0 a $6,24 \times 10^{-2}$ mm/ano), como pode ser visto no Apêndice A.

A Tabela 13 apresenta a taxa de corrosão ($\text{g/m}^2/\text{dia}$) da amostra 3, cujo ensaio durou 5 semanas ininterruptas. Comparando esta tabela com a Tabela 11, pode-se chegar a conclusão que a liga de alumínio AA1100 pode ser considerada uma liga resistente à corrosão para o tempo e ambiente químico estudados, o que está de acordo com o referencial teórico e os dados apresentados.

Tabela 13 – Taxa de corrosão da amostra 3 (5 semanas) de cada composição.

Composição	Temperatura	Taxa de corrosão ($\text{g/m}^2/\text{dia}$)
10-10-10	50 °C	0,0141
4-14-8	50 °C	0,0233
15-5-5	50 °C	0,0241
10-10-10	Ambiente	0
4-14-8	Ambiente	0,0298
15-5-5	Ambiente	0,0033

5 CONCLUSÕES

Após os ensaios de imersão, foi constatada pouca ou nenhuma perda de massa pelas amostras, variando de 0 a 3,2 g/m².

Os testes realizados a 50 °C se mostraram mais agressivos do que à temperatura ambiente, o que está de acordo com a cinética. Além disso, o fertilizante de composição 4-14-8 foi o mais corrosivo, provavelmente pela maior concentração de fósforo em relação ao nitrogênio. As composições 10-10-10 e 15-5-5 apresentaram corrosividade menor provavelmente pela menor razão entre fósforo e nitrogênio e também pela maior concentração de potássio do que de fósforo, o que pode ter contribuído para maior proteção da superfície do metal.

Foi possível identificar que a susceptibilidade da liga de alumínio AA1100 à corrosão diminui com o tempo para este meio, o que ocorre, provavelmente, pelo comportamento ativo-passivo do alumínio em função da presença da camada passiva. Verificou-se também que a corrosividade dos fertilizantes utilizados aumentou em função do tempo, o que indica a provável formação de produtos de corrosão com o tempo. Acredita-se que este produto de corrosão tenha em sua composição fosfato, porém testes químicos devem ser realizados para confirmação dessa hipótese.

Pelos dados obtidos, conclui-se que a liga de alumínio AA1100 é resistente à corrosão para esses meios utilizados e para o tempo estudado, pois após um tempo mais prolongado de exposição ao meio corrosivo, pode ser que a taxa de corrosão volte a subir pela formação de mais produtos de corrosão e maior corrosividade do meio, o que diminuiria a resistência do material à corrosão. Outra possibilidade é que o material utilizado pela empresa pode não ter sido a liga informada ou o ambiente corrosivo foi diferente do apontado pela empresa. Para um estudo mais profundo da corrosão, recomenda-se testes mais longos ou em situação mais agressivas, como maior temperatura, utilização de fertilizantes sólidos para estudo da tribologia, além da realização de espectrometria de absorção atômica para caracterização da superfície do material e do meio corrosivo.

Pelos testes realizados não foi possível identificar o tipo de corrosão encontrada, porém, acredita-se que essa pode ter sido do tipo uniforme por não apresentar características pontuais de corrosão.

Para mitigar a possibilidade de corrosão, poderia ser aplicada uma tinta anticorrosiva (primer) nas caçambas, conferindo mais uma camada de proteção (além da passiva) ao material.

A liga estudada é uma liga que possui excelente resistência à corrosão, porém possui propriedades mecânicas limitadas em comparação com outras ligas de alumínio. Possivelmente o problema enfrentado pela empresa tenha sido corrosão associada a esforços mecânicos, porém ensaios mecânicos associados a ambientes agressivos devem ser realizados para se confirmar isso.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1 - Testes de imersão mais longos para melhor simulação das condições reais;
- 2 - Testes em outras composições de fertilizantes mistos para comparação;
- 3 - Análise química para identificação do produto de corrosão em solução;
- 4 - Realização de espectroscopia de absorção atômica para caracterização da superfície do material e do meio corrosivo;
- 5 - Realização de espectroscopia de fotoelétrons excitados por raio-x (XPS) para melhor análise da superfície das amostras, identificando possíveis incrustações e a presença da camada passiva;
- 6 - Estudo da vida útil do material por meio de ensaios mecânicos associados a ambientes agressivos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B208-06**: Standard specification for aluminum and aluminum-alloy sheet and plate. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G1-90**: Preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G31-72**: Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. 2^a. ed. São Paulo. 2007. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/site/pdf/fundamentos-do-aluminio/001.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.

AUSETUTE. Hall-Heroult Cell for the Production of Aluminium. Disponível em: <<http://www.usetute.com.au/hallhero.html>>. Acesso em: 20 Setembro 2016.

BABOIAN, Robert. et al. **Corrosion Tests and Standards**: Application and Interpretation. 2^a. ed. Baltimore: ASTM International, 2005.

CONSTANTINO, Vera R. Leopoldo. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 490-498, ago. 2002.

CRAIG, Bruce. D.; ANDERSON, David. B. **Handbook of Corrosion Data**. 3^a. ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002.

DAVIS, Joseph. R. **Corrosion**: Understanding the Basics. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000.

DAVIS, Joseph R. **ASM Specialty Handbook**: Aluminum and Aluminum Alloys. Materials Park, Ohio: ASM International, 1993.

DAVIS, Joseph R. **Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys**. Materials Park, Ohio: ASM International, 1999.

EKER, Bulent.; YUKSEL, Ender. Solutions to corrosion caused by agricultural chemicals. **Trakia Journal of Sciences**, Tekirdag, v. 3, n. 7, p. 1-6, 2005.

FELSKE, V. S. et al. Estudo do concreto armado em uma indústria de fertilizantes situada em zona marinha. **Repositório Institucional da Universidade Federal do Rio Grande**, Rio Grande, 17 p., 2004.

FOSFERTIL. Fosfertil: perfil corporativo e operacional. **Vale fertilizantes**, 2010.

Disponível em:

<<http://www.valefertilizantes.com/mda/modulos/conteudo/reInvestidores/riSobCamp/docs/FOSFERTIL%20-%20Atualizado%20em%2010-02-2010.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2017.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GHALI, Edward. **Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys - Understanding, performance and testing**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

HABASHI, Fathi. A short history of hydrometallurgy. **Hydrometallurgy**, Quebec city, v. 79, p. 15-22, Junho 2005.

HATFIELD, J. D. et al. Corrosion in fertilizer equipment - Corrosion of Metals by Liquid Mixed Fertilizers. **Agricultural and Food Chemistry**, v. 6, n. 7, p. 524-531, jul. 1958.

HIND, Andrew. R.; BHARGAVA, Suresh. K.; GROCOTT, Stephen. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces - A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 146, p. 359-374, 1999.

MAGHRABY, A. A. E. Corrosion Inhibition of Aluminum in Hydrochloric Acid Solution Using Potassium Iodate Inhibitor. **The Open Corrosion Journal**, Giza, Egito, v. 2, p. 189-196, 2009.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Corrosion control of agricultural equipment and buildings. Disponível em:

<http://www.npl.co.uk/upload/pdf/corrosion_control_of_agricultural_equipment_and_buildings.pdf>. Acesso em: 22 set. 2016.

NUNES, Rafael et al. **ASM Handbook: Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials**. Materials Park, Ohio: ASM International, v. 2, 1992.
OKI, Makanjuola.; ANAWE, Paul. A. L. A review of corrosion in agricultural industries. **Physical Science International Journal**, v. 5, n. 4, p. 216-222, jan. 2015.

OLIVEIRA, Elton Inácio de. **Avaliação do desempenho de revestimentos híbridos modificados com inibidores no combate à corrosão de ligas de alumínio**. 2015. 192 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, Janaina D. C. P. T. de. **Evolução da microestrutura e da textura durante a laminação a frio e a recristalização de alumínio com diferentes níveis de pureza**. 2009. 252 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2009

PRASAD, Shiva. Studies on the Hall-Heroult Aluminum Electrowinning Process. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campina Grande, v. 113, p. 245-251, 2000.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Matéria**, Recife, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.

SILVEROL, Aline C. **Processo Humifert para fertilizantes alternativos organofosfatados: obtenção a partir do minério de angico dos dias, caracterização dos compostos e avaliação da eficiência agrônômica**. 2006. 174 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2006.

SOUZA, Fabrício M. **Estudo da microestrutura, da textura cristalográfica e da recristalização em chapas obtidas por lingotamento contínuo e semicontínuo da liga de alumínio AA4006**. 2012. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2012.

STARKE, E. A. J.; STALEY, J. T. Application of Modern Aluminium Alloys to Aircraft. **Progress in Aerospace Science**, v. 32, p. 131-172, 1996.

UWIRINGIYIMANA, E. et al. The effect of corrosion inhibitors on stainless steels and aluminium alloys: A review. **African Journal of Pure and Applied Chemistry**, Yola, Nigeria, v. 10, p. 23-32, 2016.

VREELAND, D. C.; KALIN, S. H. Corrosion of Metals by Liquid Fertilizer Solutions. **National Association of Corrosion Engineers**, New York, v. 12, p. 53-59, abr. 1956.

WILKENING, S.; WINKHAUS, G. Material problems in electrowinning of aluminium by the Hall-Hérout process. **Journal Of Applied Electrochemistry**, v. 19, p. 596-604, 1989.

APÊNDICE A – DADOS OBTIDOS PELOS ENSAIOS DE IMERSÃO

Tabela 14 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 10-10-10 a 50 °C

10 10 10	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Largura (mm)	12,45	11,615	11,295	11,07	
Comprimento (mm)	26,28	26,29	26,05	26,64	
Espessura (mm)	2,96	2,95	2,94	2,91	
Área superficial média (mm ²)	883,6536	834,3562	808,0581	809,2818	
Massa inicial (mg)	2565,4	2339,1	2262,5	2191,9	
Massa final (mg)	2564,3	2338,5	2262,1	2190,7	
Perda de massa (mg)	1,1	0,6	0,4	1,2	-0,2
Perda de massa superficial (g/m ²)	1,2448	0,7191	0,4950	1,4828	
Dias de ensaio	7	28	35	7	
Densidade (g/cm ³)	2,71	2,71	2,71	2,71	
Penetração (mm)	4,59E-04	2,65E-04	1,83E-04	5,47E-04	-8,27E-05
Taxa de corrosão (mm/ano)	2,40E-02	3,46E-03	1,90E-03	2,85E-02	-1,55E-03
Taxa de corrosão (g/m ² /dia)	0,1777	0,0257	0,0141	0,2117	0,0000
pH do fertilizante	5,1		6,5	5,82	

Tabela 15 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 10-10-10 a temperatura ambiente

10 10 10	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Largura (mm)	11,085	11,66	11,51	10,505	
Comprimento (mm)	24,41	26,36	24,33	24,34	
Espessura (mm)	2,96	2,94	2,95	2,92	
Área superficial média (mm ²)	751,3001	838,2728	771,5326	714,8782	
Massa inicial (mg)	2100,4	2341,8	2166,4	1946,6	
Massa final (mg)	2100,7	2342,1	2166,4	1945,7	
Perda de massa (mg)	-0,3	-0,3	0	0,9	0,3
Perda de massa superficial (g/m ²)	-0,3993	-0,3579	0,0000	1,2590	
Dias de ensaio	7	28	35	7	7
Densidade (g/cm ³)	2,71	2,71	2,71	2,71	0
Penetração (mm)	-1,47E-04	-1,32E-04	0,00E+00	4,65E-04	1,32E-04
Taxa de corrosão (mm/ano)	-7,68E-03	-1,72E-03	0,00E+00	2,42E-02	1,72E-03
Taxa de corrosão (g/m ² /dia)	0,0000	0,0000	0,0000	0,1797	0,0000
pH do fertilizante	4,64		4,74	4,63	

Tabela 16 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 4-14-8 a 50 °C

4 14 8	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Largura (mm)	12,075	14,02	12,53	10,93	
Comprimento (mm)	26,45	26,1	25,34	26,59	
Espessura (mm)	2,95	2,96	2,96	2,94	
Área superficial média (mm ²)	866,065	969,3544	859,2108	801,875	
Massa inicial (mg)	2464,5	2856,7	2486,7	2205,2	
Massa final (mg)	2463,8	2855,5	2486	2202,6	
Perda de massa (mg)	0,7	1,2	0,7	2,6	-0,5
Perda de massa superficial (g/m ²)	0,8083	1,2379	0,8147	3,2424	
Dias de ensaio	7	28	35	7	7
Densidade (g/cm ³)	2,71	2,71	2,71	2,71	0
Penetração (mm)	2,98E-04	4,57E-04	3,01E-04	1,20E-03	-1,56E-04
Taxa de corrosão (mm/ano)	1,56E-02	5,95E-03	3,14E-03	6,24E-02	-2,82E-03
Taxa de corrosão (g/m ² /dia)	0,1154	0,0442	0,0233	0,4629	0,0000
pH do fertilizante	4,94		6,15	6,61	

Tabela 17 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 4-14-8 a temperatura ambiente

4 14 8	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Largura (mm)	11,69	11,2	10,985	10,6	
Comprimento (mm)	24,45	26,39	25,13	26,18	
Espessura (mm)	2,97	2,93	2,97	2,92	
Área superficial média (mm ²)	786,3126	811,4134	766,6292	769,8112	
Massa inicial (mg)	2205,4	2252,8	2120,5	2107,1	
Massa final (mg)	2205,2	2251,8	2119,7	2106	
Perda de massa (mg)	0,2	1	0,8	1,1	-0,2
Perda de massa superficial (g/m ²)	0,2544	1,2324	1,0435	1,4289	
Dias de ensaio	7	28	35	7	7
Densidade (g/cm ³)	2,71	2,71	2,71	2,71	0
Penetração (mm)	9,39E-05	4,55E-04	3,85E-04	5,27E-04	-6,97E-05
Taxa de corrosão (mm/ano)	4,89E-03	5,93E-03	4,02E-03	2,75E-02	-1,91E-03
Taxa de corrosão (g/m ² /dia)	0,0363	0,0440	0,0298	0,2040	0,0000
pH do fertilizante	4,51		4,65	4,62	

Tabela 18 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 15-5-5 a 50 °C

15 5 5	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Largura (mm)	14,05	14,37	13,64	12,33	
Comprimento (mm)	24,23	24,27	26,09	26,31	
Espessura (mm)	2,97	2,96	2,96	2,92	
Área superficial média (mm ²)	908,2462	926,2686	946,9368	874,4622	
Massa inicial (mg)	2654,9	2709,8	2790,6	2492,4	
Massa final (mg)	2654,5	2709,4	2789,8	2490,7	
Perda de massa (mg)	0,4	0,4	0,8	1,7	0,4
Perda de massa superficial (g/m ²)	0,4404	0,4318	0,8448	1,9441	
Dias de ensaio	7	28	35	7	7
Densidade (g/cm ³)	2,71	2,71	2,71	2,71	0
Penetração (mm)	1,63E-04	1,59E-04	3,12E-04	7,17E-04	1,52E-04
Taxa de corrosão (mm/ano)	8,47E-03	2,08E-03	3,25E-03	3,74E-02	1,17E-03
Taxa de corrosão (g/m ² /dia)	0,0629	0,0154	0,0241	0,2775	0,0087
pH do fertilizante	6,2		6,57	6,80	

Tabela 19 – Amostras imersas em fertilizante misto de composição 15-5-5 a temperatura ambiente

15 5 5	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Largura (mm)	11,1	11,12	12,51	11,035	
Comprimento (mm)	25,88	25,13	25,51	25,23	
Espessura (mm)	2,93	2,95	2,95	2,93	
Área superficial média (mm ²)	791,2388	772,7662	862,5782	769,339	
Massa inicial (mg)	2190,9	2161,1	2498,3	2150,9	
Massa final (mg)	2191,1	2160,9	2498,2	2150,3	
Perda de massa (mg)	-0,2	0,2	0,1	0,6	-0,1
Perda de massa superficial (g/m ²)	-0,2528	0,2588	0,1159	0,7799	
Dias de ensaio	7	28	35	7	7
Densidade (g/cm ³)	2,71	2,71	2,71	2,71	0
Penetração (mm)	-9,33E-05	9,55E-05	4,28E-05	2,88E-04	-5,27E-05
Taxa de corrosão (mm/ano)	-4,86E-03	1,24E-03	4,46E-04	1,50E-02	-7,99E-04
Taxa de corrosão (g/m ² /dia)	0,0000	0,0092	0,0033	0,1113	0,0000
pH do fertilizante	5,3		5,46	5,58	