

ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Juliana Otaviano Sousa

Mariana Mitsuko Shimoda

ANÁLISE COMPARATIVA DA CORROSÃO ENTRE ELEMENTOS DE FIXAÇÃO EM
AÇO INOXIDÁVEL E AÇO CARBONO FOSFATIZADO

RESENDE

2021

Juliana Otaviano Sousa

Mariana Mitsuko Shimoda

ANÁLISE COMPARATIVA DA CORROSÃO ENTRE ELEMENTOS DE FIXAÇÃO EM
AÇO INOXIDÁVEL E AÇO CARBONO FOSFATIZADO

Monografia apresentada à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras Dom Bosco Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Msc. Heloiza Alves Gomes Machado

RESENDE

2021

Catálogo na fonte
Biblioteca Central da Associação Educacional Dom Bosco – Resende-RJ

S725 Sousa, Juliana Otaviano
Análise comparativa da corrosão entre elementos de fixação em aço inoxidável e aço carbono fosfatizado / Juliana Otaviano Souza; Mariana Mitsuko Shimoda - 2021.
48f.

Orientador: Heloiza Alves Gomes Machado
Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à finalização do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.

1. Engenharia. 2. Corrosão. 3. Aço inoxidável. 4. Aço carbono. 5. Fosfatização. I. Shimoda, Mariana Mitsuko. II. Machado, Heloiza Alves Gomes. III. Faculdade de Engenharia de Resende. IV. Associação Educacional Dom Bosco. V. Título.

CDU 620.19(043)

Juliana Otaviano Sousa

Mariana Mitsuko Shimoda

ANÁLISE COMPARATIVA DA CORROSÃO ENTRE ELEMENTOS DE FIXAÇÃO EM
AÇO INOXIDÁVEL E AÇO CARBONO FOSFATIZADO

Monografia apresentada à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras Dom Bosco Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA AVALIADORA:

Prof. Dr. Rodrigo Alexandre de Alencar Nascimento

Prof. Evandro Salgueiro da Silva

Prof. Msc. Heloiza Alves Gomes Machado

(Orientador)

Resende, 19 de novembro de 2021.

Dedico este trabalho a nossa família que sempre nos apoiou, nossos amigos por participar de toda trajetória nesses anos de faculdade e nossos professores que nos ajudaram e contribuíram para nossa formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por nos proporcionar passar por esse momento tão importante da nossa vida, e nos dar forças todos os dias para continuar.

À nossa família, que foi a nossa base e nosso sustento nestes anos, que nos apoiaram e incentivaram a todo momento.

Aos nossos amigos Bruno e Rodolfo, por sempre estarem presentes, por serem os melhores companheiros de estudos e assim, formar nosso quarteto.

À nossa orientadora e professora Heloiza, que tanto nos ajudou e nos impulsionou nos estudos e nos orientava da melhor maneira.

E a todos os professores e amigos que não foram nomeados, mas que foram importantes no decorrer desses anos e neste trabalho, nossos sinceros agradecimentos.

Devemos a todos nossa gratidão.

“Às estrelas que ouvem e aos sonhos que são atendidos.” (A Corte de Névoa e Fúria – Sarah J. Maas)

RESUMO

A corrosão é um processo espontâneo e está presente em diversos meios como em equipamentos industriais, estruturas metálicas, concreto, no cotidiano, entre outros, podendo ser minimizada através de técnicas de proteção da superfície metálica, como a oxidação negra ou fosfatização negra. No decorrer dos anos, novas técnicas de prevenção de corrosão foram aperfeiçoadas e desenvolvidas. O processo de fosfatização, é utilizado como tratamento prévio para diversos tipos de metais para diminuir a incidência de corrosão. Neste trabalho foi avaliado o efeito da fosfatização negra (oxidação negra a frio) em aço carbono, após o tratamento, os elementos de fixação foram submetidos ao ensaio acelerado de corrosão em solução aquosa de ácido sulfúrico, simulando chuva ácida e foram avaliados visualmente quanto ao aspecto superficial utilizando um macroscópio. A análise dos resultados obtidos sugere, inicialmente, que a oxidação negra utilizada no estudo é ideal para situações não tão exigentes, visto que o parafuso foi corroído de maneira severa mesmo com o tratamento.

Palavras-chaves: Corrosão. Aço carbono. Aço inoxidável. Fosfatização.

ABSTRACT

Corrosion is a spontaneous process and is present in various environments such as industrial equipment, metal structures, concrete, in everyday life, among others, and can be minimized through metal surface protection techniques, such as black oxidation or black phosphating. Over the years, new corrosion prevention techniques have been refined and developed. The phosphating process is used as a pre-treatment for different types of metals to reduce the incidence of corrosion. In this work, the effect of black phosphating (black cold oxidation) on carbon steel was evaluated. After treatment, the fastening elements were subjected to an accelerated corrosion test in an aqueous solution of sulfuric acid, simulating acid rain and were visually evaluated for surface appearance using a macroscope. The analysis of the results obtained initially suggests that the black oxidation used in the study is ideal for situations that are not so demanding, since the screw was severely corroded even with the treatment.

Keywords: Corrosion. Carbon steel. Stainless steel. Phosphating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Corrosão Uniforme.....	19
Figura 2 Corrosão por placa	20
Figura 3 Corrosão Alveolar	20
Figura 4 Corrosão puntiforme (Pite)	21
Figura 5 Corrosão filiforme em tampa de lata de aço ampliado 10x por microscópio de luz..	22
Figura 6 Corrosão em torno de solda	23
Figura 7 Parafuso aço carbono	28
Figura 8 Parafuso aço inoxidável AISI 304	28
Figura 9 Quimox.....	29
Figura 10 Oxi Black F9	29
Figura 11 Desengripante.....	30
Figura 12 Fluxograma de etapas de testes	31
Figura 13 (a) Parafusos imersos no Quimox. (b) Parafusos após 15 minutos imerso no produto	32
Figura 14 Enxague dos parafusos em água destilada	32
Figura 15 Parafuso imerso no produto Oxi black. a) Parafuso imerso por 5 minutos. b) Parafuso imerso após 20 minutos	33
Figura 16 Parafusos com desengripante	34
Figura 17 Aço carbono fosfatizado (a) e aço inoxidável (b) imersos em solução de H ₂ SO ₄ ...	34
Figura 18 (a) Parafuso de aço carbono após 11 dias. (b) Parafuso de aço carbono após 20 dias.	35
Figura 19 Corrosão do aço carbono.....	36
Figura 20 Corrosão do aço inoxidável.....	36
Figura 21 Esteoscópio SZ61 - Olympus.....	37
Figura 22 Corpo do parafuso 1 após teste de corrosão.....	38
Figura 23 Corpo do parafuso 1 de aço carbono.....	38
Figura 24 Rosca do parafuso 1 de aço carbono	39
Figura 25 Corrosão na cabeça do parafuso 1 de aço carbono	39
Figura 26 Corpo do parafuso 2 após os testes de corrosão.....	40
Figura 27 Corrosão no corpo do parafuso 2 de aço carbono	40
Figura 28 Cabeça do parafuso 2 após a corrosão	41
Figura 29 Rosca corroída do parafuso 2.....	41

Figura 30 Aço inoxidável após teste de corrosão	42
Figura 31 Análise macrografia do aço inoxidável após os testes de corrosão	42
Figura 32 Cabeça do parafuso de aço inoxidável	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Concentrações típicas de impurezas na atmosfera.....	16
Tabela 2	Propriedades mecânicas de inoxidáveis martensíticos recozidos.....	25
Tabela 3	Propriedades típicas de inoxidáveis asteníticos recozidos (ou solubilizados).....	26
Tabela 4	Massa inicial dos parafusos	33
Tabela 5	Massa inicial e final dos parafusos	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivos Específicos	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Metodologia da Pesquisa	14
1.4	Limitação da pesquisa	14
1.5	Estrutura do trabalho.....	14
2	DESENVOLVIMENTO.....	15
2.1	Corrosão	15
2.2	Meios corrosivos.....	16
2.2.1	Corrosão atmosférica.....	16
2.2.2	Corrosão do Solo	17
2.2.3	Corrosão em água doce.....	17
2.2.4	Corrosão em água do mar.....	18
2.3	Tipos de corrosão	18
2.3.1	Corrosão Uniforme.....	18
2.3.2	Corrosão por placa.....	19
2.3.3	Corrosão Alveolar	20
2.3.4	Corrosão Puntiforme ou pite.....	20
2.3.5	Corrosão Filiforme	21
2.3.6	Corrosão por solda de aço carbono	22
2.4	Aço carbono e aço inoxidável.....	23
2.4.1	Aço Carbono.....	23
2.4.2	Aço inoxidável.....	24
2.5	Fosfatização	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Análise da corrosão em solução de H₂SO₄	36
4.2	Análise macrográfica.....	37
4.2.1	Parafuso em aço carbono.....	37
4.2.2	Parafuso em aço inoxidável.....	42

4.3	Perda de massa	43
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
	REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um fenômeno natural que pode ocorrer em inúmeros meios corrosivos, sendo um desgaste de um material, ou seja, a perda de massa do mesmo. A corrosão atinge a grande maioria dos metais, tornando-os frágeis, e sem condições de uso, para manter sua vida útil e prevenir seu bom estado, deve-se fazer as manutenções adequadas, sendo elas: preventivas, preditivas e corretivas, voltadas a manter o metal em bom estado por um período mais longo.

Bardal (2007) afirma que aproximadamente 4% do Produto Interno Bruto (PIB) de um país industrializado é gasto em danos causados por corrosão. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2020, o Brasil obteve um PIB de 7,4 trilhões de reais. Levando em consideração a afirmação de Bardal (2007), os gastos em 2020 em danos por corrosão no Brasil, foram de aproximadamente 296 milhões de reais.

Segundo Gerhardus (2016), industrialmente, a corrosão gera grandes impactos no quesito de custo. A ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão (2018), estima que uma parcela superior a 30% do aço produzido no mundo seja usada para reposição de peças e partes de equipamentos e instalações deterioradas pela corrosão. De forma geral, os metais em meios corrosivos, estão suscetíveis à corrosão e os efeitos dessa degradação podem comprometer diversas aplicações (BUCHWEISHAIJA, 2009)

No presente estudo será demonstrado testes realizados nos elementos de fixação em aço carbono fosfatizado com a fosfatização negra e aço inoxidável, para identificar os tipos de corrosão gerado e verificar a resistência à corrosão dos materiais ensaiados.

1.1 Objetivos

Analisar a corrosão em elementos de fixação com composições e propriedades distintas, sendo eles: aço inoxidável e aço carbono, através de ensaios realizados em laboratório por imersão desses materiais em solução de ácido sulfúrico, simulando chuva ácida.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Realizar e estudar a fosfatização do aço carbono;
- Avaliar o tipo de corrosão por meio de ensaios de macroscopia;

- Comparar o processo corrosivo do aço carbono fosfatizado com aço inoxidável.

1.2 Justificativa

Processos corrosivos geram grandes impactos econômicos, muitas vezes devido à substituição de estruturas, elementos e equipamentos. Em 2013, o custo gerado no mundo pela corrosão foi de aproximadamente 2,5 trilhões de dólares. Processos que podem retardar o efeito da corrosão são de grande importância para melhor confiabilidade em equipamentos, máquinas e diminuição de custos.

1.3 Metodologia da Pesquisa

O presente estudo tem como tipo de metodologia a pesquisa aplicada exploratória, visto que, o tipo de análise pode ser aplicado na prática estudando fenômenos e detalhando dados que foram analisados em laboratório.

1.4 Limitação da pesquisa

A pesquisa será feita utilizando apenas parafusos de aço inoxidável AISI 304 e aço carbono. A fosfatização será a oxidação negra a frio com o produto Oxi black.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente estudo está dividido em 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema da corrosão bem como os objetivos (objetivo geral e específico) do trabalho.

No capítulo 2 é abordado os meios corrosivos, tipos de corrosão, detalhamento do aço carbono e aço inoxidável e a fosfatização negra.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais e métodos escolhidos para avaliar a resistência à corrosão nos elementos de fixação.

No capítulo 4, é exposto a discussão de resultados obtidos através dos testes e análises feitas no estudo, sendo comparado os resultados esperados com os resultados obtidos.

A conclusão é exposta no capítulo 5, além de recomendações para estudos futuros e por fim, está representado as fontes consultadas no estudo, nas referências.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Corrosão

Segundo Gentil (2011), corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente um metal, por ação química ou eletroquímica em um meio que podem ser ou não associadas à esforços mecânicos. Para Rivie (2008), corrosão é o ataque destrutivo de um metal por reação química e eletroquímica. Deteriorações físicas são descritas como erosão e ametais não estão incluídos nessa definição de corrosão. A corrosão é comum e podem ser encontrados em diversos segmentos, como indústrias químicas, petrolíferas, indústrias automotivas e diversos outros (GENTIL, 2011).

De acordo com Araújo (2003), o mecanismo da corrosão química é caracterizado por uma reação química do metal com o agente corrosivo, sem que haja deslocamento dos elétrons envolvidos. Assim, o produto da corrosão forma-se na superfície do metal exposta ao meio.

Problemas com a corrosão geram perdas e podem ser classificadas em perdas diretas e perda indiretas.

São perdas diretas: os custos de substituição das peças ou equipamentos que sofreram corrosão, incluindo-se energia e mão de obra; os custos e a manutenção dos processos de proteção (proteção catódica, revestimentos metálicos e não metálicos, pinturas etc.)(GENTIL, 2011, p.2).

Gentil (2011), descreve perdas indiretas como as mais difíceis de classificar podendo ser paralisações acidentais, perda de eficiência, contaminação de produto e superdimensionamento nos projetos.

As perdas indiretas são mais difíceis de avaliar, mas um breve exame das perdas típicas dessa espécie conduz à conclusão de que podem totalizar custos mais elevados que as perdas diretas e nem sempre podem ser quantificados. (GENTIL, 2011, p. 2)

A corrosão tem três principais importâncias, sendo elas, econômica, segurança e conservação. A corrosão pode comprometer a segurança de componentes, como lâminas, peças de avião e direção veicular, e assim, causar acidentes. Os engenheiros de corrosão visam reduzir perdas no material, como perdas econômicas (RIVIE, 2008).

2.2 Meios corrosivos

A maioria dos metais nos meios comuns é instável, tendo a reverter para formas mais estáveis, como alguns minérios encontrados na natureza. Os meios corrosivos são inúmeros e dentre eles, destacam-se os meios de corrosão atmosférica, corrosão do solo, corrosão em água doce e água salgada.

2.2.1 Corrosão atmosférica

Segundo Veleva (2003), a corrosão atmosférica é a degradação e destruição de materiais metálicos devido a interação com a atmosfera terrestre na temperatura do ar, umidade, química do ar e o clima. Esse tipo de corrosão é mais comum, admitindo que em áreas urbanas, os principais agentes corrosivos atmosféricos são os óxidos sulfurosos originados de combustíveis fósseis de veículos, indústrias e em locais próximos a usinas termoelétricas a carvão mineral. A intensidade da corrosão depende também das condições climáticas em diferentes regiões, incluindo clima seco, tropical chuvoso, úmido, polar, entre outros (CHIAVERINI, 1977).

Na atmosfera, os principais contaminantes (tabela 1), são óxidos de enxofre e principalmente o dióxido de enxofre que exerce grande influência na corrosão atmosférica dos aços. As duas fontes de dióxido de enxofre na atmosfera são a oxidação atmosférica do ácido sulfídrico (H_2S), produzido pela decomposição contendo enxofre e a queima de combustíveis que tenha enxofre (ARAÚJO, 2003).

Tabela 1 Concentrações típicas de impurezas na atmosfera

IMPUREZA	CONCENTRAÇÕES ($\mu g\ m^{-3}$)	
	REGIÃO INDUSTRIAL	REGIÃO RURAL
Dióxido de enxofre	100 - 350	40 - 100
Trióxido de enxofre	1 - 3,5	0,4 - 1
Ácido sulfídrico	1,5 - 90	0,15 - 0,45
Amônia	4,8	2,1
Cloreto	2,7 - 8,2	5,4
Partículas de fumaça	100 - 250	15 - 60

Fonte: Araújo, 2003

De acordo com Araújo (2003), a atmosfera industrial é característica pela contaminação de compostos de enxofre. O dióxido de enxofre é captado pela umidade das partículas de pó oxidando por processos catalíticos e formando ácido sulfúrico que se deposita em gotículas microscópicas nas superfícies expostas, juntamente com uma parte de dióxido de ácido sulfuroso e de ácido sulfuroso. Esses contaminantes na atmosfera industrial produzem uma película de ácido altamente corrosiva nas superfícies expostas.

Aços com ferrugens absorvem quantidades consideráveis de SO_2 e em condições de umidade, o SO_2 forma-se ácido sulfúrico. Atmosferas industriais são 50 a 100 vezes mais corrosivas do que áreas desertas. A corrosão atmosférica é influenciada por vários fatores, muitas vezes relacionadas à temperatura, umidade relativa, direção e velocidade dos ventos, radiação solar, entre outros (ARAÚJO, 2003).

Coburn (1984), mostra que ensaios realizados por especialistas americanos, provam que a corrosão atmosférica é em função composição do material do que da espessura do corpo de prova. A velocidade de corrosão em ambientes industriais e rurais decrescem mais rapidamente. Um acréscimo de cobre (de 0,01 para 0,04%) provoca uma grande mudança no comportamento do material em relação à resistência a corrosão e, para combater a corrosão atmosférica, além da adição citada acima, tem-se processos como galvanização, e pintura aplicada em peças bem limpas e com uma primeira camada de recobrimento (CHIAVERINI, 1977).

2.2.2 Corrosão do Solo

Em estruturas enterradas, a corrosão é devido ao baixo pH, correntes parasitas, baixa resistividade e ação de bactérias. A ação de bactérias são responsáveis por mais de 50% de todas as falhas que ocorrem em metais enterrados. Também temos como fatores fundamentais a água e o oxigênio. Quando o pH estiver na faixa de 5 a 9, esse fator não é importante no sentido de afetar a velocidade de corrosão, somente a resistividade do solo e a concentração de oxigênio seria crítico. Os solos mais corrosivos são os que contém grande concentração de sais solúveis e pela sua presença apresenta baixa resistividade(CHIAVERINI, 1977).

2.2.3 Corrosão em água doce

A água doce inclui águas de rios, lagos, represas, poços, dentre outros, estando poluídas ou não. Segundo Chiaverini (1977), os fatores de maior importância no sentido de acelerar a velocidade de corrosão são por gases dissolvidos na água. Para o autor, o oxigênio age por si só e acelera a ação do dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e outros gases sólidos dissolvidos na água.

2.2.4 Corrosão em água do mar

A água salgada consiste numa solução uniforme de cloretos de sódio e magnésio em água (CHIAVERINI, 1977).

O ambiente marinho é o meio mais corrosivo dos naturais, a água do mar contém cerca de 3,4% de sais dissolvidos, sendo levemente alcalina, com pH de aproximadamente 8. A corrosão na água salgada é afetada pela temperatura, velocidade e pelo oxigênio e organismos biológicos presente nesse meio. O aço carbono em água do mar sem agitação tem uma velocidade de corrosão média de 4,0 a 7,0 mpy, enquanto o aço inoxidável tipo 316 e 304 não há alteração, exceto pela formação de pites (D'ALKAINE et al., 1988).

2.3 Tipos de corrosão

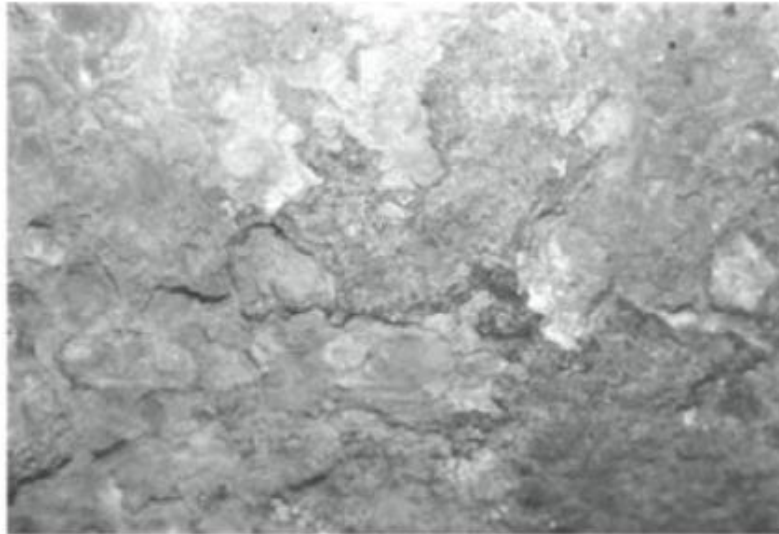
A corrosão pode se formar em diversos tipos e formas, no qual o estudo do mesmo faz com que seja possível identificar e escolher o melhor tipo de proteção. Há diversos tipos de corrosão, sendo os mais comuns:

- Uniforme;
- Em placas;
- Alveolar;
- Puntiforme;
- Intergranular;
- Filiforme e,
- Em torno de solda.

2.3.1 Corrosão Uniforme

Conforme Gentil (2011), a corrosão uniforme, figura 1, é o mais comum e o mais fácil a ser controlado, com muita pouca aderência e a característica mais comum é a perda uniforme de massa e espessura. Ocorre devido a exposição direta do metal, como o aço carbono, vindo de um ambiente agressivo, que muitas vezes não tem um sistema protetor.

Figura 1 Corrosão Uniforme



Fonte: Gentil, 2011

Do ponto de vista da corrosão uniforme, pode-se classificar o material em 3:

- (I) Taxa de corrosão menor que 0,1 mm/ano ou menor que 5mpy: Os materiais são resistentes à corrosão e podem ser utilizados sem restrições.
- (II) Taxa de corrosão entre 0,1 e 1,1 mm/ano: Os materiais podem ser utilizados onde uma certa corrosão é tolerável.
- (III) Taxa de corrosão maior que 1,1 mm/ano: Geralmente não são utilizados materiais com essas taxas.

2.3.2 Corrosão por placa

Ainda de acordo com Gentil (2011), a corrosão por placa (Figura 2) se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações devido ao descolamento, eles se desprendem do material.

Figura 2 Corrosão por placa



Fonte: Gentil, 2011

2.3.3 Corrosão Alveolar

Corrosão Alveolar (figura 3), se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente- te menor que o seu diâmetro (GENTIL, 2011).

Figura 3 Corrosão Alveolar



Fonte: Imagem google

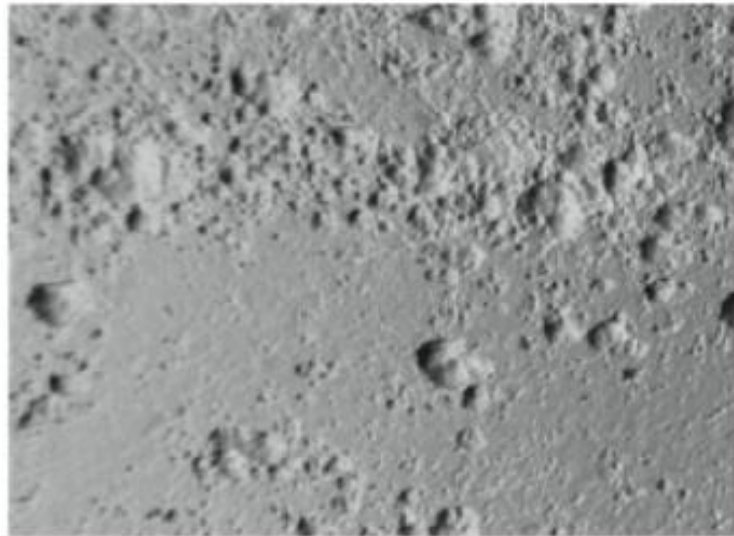
2.3.4 Corrosão Puntiforme ou pite

Frankel (2003), afirma que aços inoxidáveis e ligas de alumínio, são úteis por causa de filmes passivo, que são camadas finas de óxido, essa camada se forma naturalmente na superfície do metal e reduzem a taxa de corrosão das ligas. A corrosão puntiforme ou por pite se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo

pites (figura 4), que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro (GENTIL, 2011). Esse tipo de corrosão tem uma forma muito localizada, apresentando um ataque intenso em áreas de ordem de mm^2 , permanecendo o metal ao redor, sem sofrer corrosão. D'Alkaine et al. (1988), estima que ataques por pite podem ser da ordem de 30.000 a um milhão de vezes mais rápido do que no restante da superfície.

Inúmeras ligas como os aços inoxidáveis apresentam suscetibilidade a pites, de modo geral, os metais que são particularmente sensíveis a esse tipo de corrosão são aqueles que dependem de filmes de óxido para a resistência a corrosão (D'ALKAINE et al., 1988).

Figura 4 Corrosão puntiforme (Pite)

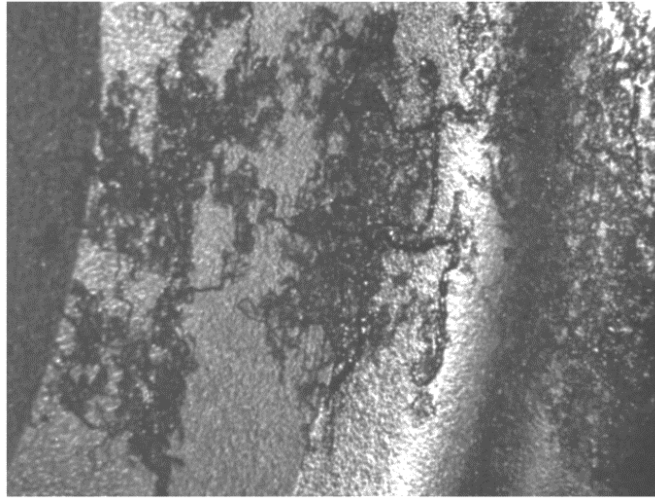


Fonte: Gentil, 2011

2.3.5 Corrosão Filiforme

De acordo com Hahin (2003) a corrosão filiforme, ocorre em superfícies metálicas revestidas com filme orgânico de 0,05 a 0,1mm de espessura. Esse tipo de corrosão é caracterizado pelo aparecimento de finos filamentos, como na figura 5, em direções aleatórias com um ou mais locais de iniciação. Os filamentos formados pela corrosão podem se propagar em direções e distâncias longas.

Figura 5 Corrosão filiforme em tampa de lata de aço ampliado 10x por microscópio de luz



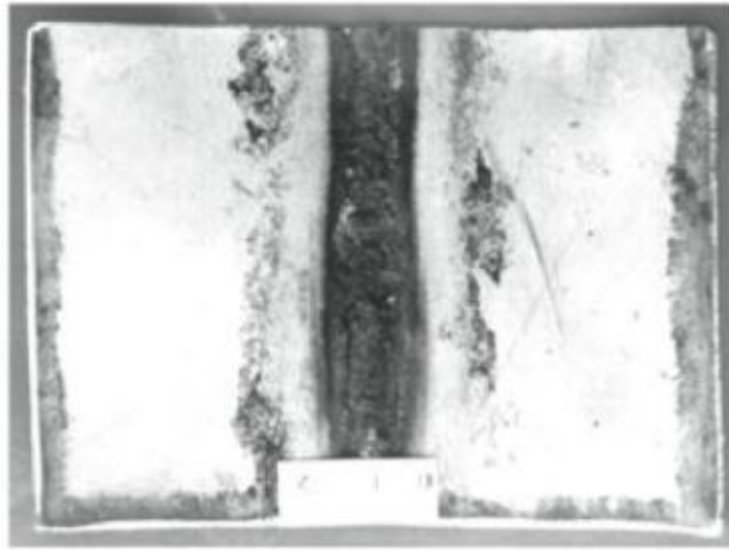
Fonte: Hahin (2003)

A corrosão filiforme ocorre em aço carbono pintado, puro, latas de aço revestidas, chapas de alumínio, entre outros. A suscetibilidade do metal à corrosão filiforme pode ser determinada colocando as amostras revestidas em uma câmara úmida e quente. Um sal ou vapor inicial é usado antes da umidificação. A corrosão filiforme foi observada por uma ampla gama de aços carbono de baixa liga e aços folheados a estanho. A aparência desse tipo de corrosão em aços foi observada sendo um castanheiro enferrujado com uma calda em forma de filamento (HAHIN, 2003).

2.3.6 Corrosão por solda de aço carbono

A corrosão produzida por soldagem por fusão (figura 6) depende de uma série de fatores, dentro deles pode ser devido a efeitos metalúrgicos, como corrosão preferencial da zona termicamente afetada (ZTA) ou metal de solda e, também pode estar associada a aspectos geométricos como concentração de tensão na ponta de solda ou criação de fendas devido ao desenho da junta (BOND, 2003).

Figura 6 Corrosão em torno de solda



Fonte: Gentil, 2011

2.4 Aço carbono e aço inoxidável

2.4.1 Aço Carbono

O aço carbono é um dos materiais de engenharia mais utilizados, responsável por aproximadamente 85% da produção anual de aço no mundo. Esse material é usado em grandes toneladas em aplicações marítimas, produção e refino de petróleo, processamento químico e equipamentos de processamento de metal (GUNES et al. 2014).

De acordo com Dwivedi et al., (2017), o aço carbono é uma liga metálica constituída em grande parte de ferro e carbono e é incapaz de ser naturalmente passivada, estado em que a corrosão é menos abrangente. O aço carbono tem grande suscetibilidade de corrosão em soluções aquosas, como em ácido sulfúrico, ácido clorídrico e soluções salinas.

O aço-carbono pode se dividir em três categorias em relação ao teor de carbono, elas são:

- i) Baixo carbono: São aços que possuem teor de carbono $< 0,30\%$, além de possuir grande ductibilidade e são comumente utilizados para construção de pontes, edifícios, navios e peças em grandes dimensões em geral. São aços não temperáveis (PANNONI, 2006).

- ii) Médio carbono: São aços com teor de carbono entre $0,30\% < C < 0,7\%$. Esse tipo de aço é usado para produção de engrenagens, bielas, entre outros. São aços que atingem boa tenacidade se temperados e revestidos (PANNONI, 2006).
- iii) Alto carbono: Os aços com alto teor de carbono ($0,7\% < C < 2,0\%$), tem elevada dureza e resistência após a têmpera, comumente utilizado para molas e componentes agrícolas sujeitos ao desgaste (PANNONI, 2006).

2.4.2 Aço inoxidável

Conforme Silva (1988), adições de cromo aumentam a resistência à oxidação e à corrosão do aço. Os aços inoxidáveis são ligas a base de ferro que contém no mínimo aproximadamente 11% de Cr, na qual é a quantidade necessária para que não forme ferrugem em ambientes não poluídos. Poucos aços inoxidáveis contém um teor maior de 30% de Cr e menor que 50% de Fe. Uma película superficial invisível e aderente de óxido de cromo se forma no aço, fazendo com que alcance a característica de inox (BOND, 2003).

Os aços inoxidáveis são de grande importância na engenharia, em função de sua resistência à corrosão e à oxidação, além de propriedades mecânicas elevadas e grande tenacidade. Entretanto, apesar de suas características, ainda sim, o aço carbono pode sofrer a degradação. Nas palavras de Silva (1988):

Nenhum material é completamente inoxidável e deve ser escolhido de maneira correta para cada tipo de aplicação em meios corrosivos, o aço carbono comum pode apresentar resultados superior a um aço inoxidável, caso o último seja selecionado inadequadamente para uma aplicação (SILVA, 1988).

Para Silva (1988), a resistência à corrosão de ligas à base de Fe + Cr, está associada ao fenômeno de passivação, no qual ocorre a formação de uma camada de óxido mistos como ferro, cromo e outros elementos de liga e a dissolução da camada no meio corrosivo. As principais composições de aços inoxidáveis foram desenvolvidas de forma acidental, há cerca de 70 anos (STREICHER, 1977).

Os aços inoxidáveis são agrupados em três classes sendo eles os aços inoxidáveis martensíticos, aços inoxidáveis ferríticos e aços inoxidáveis austeníticos, listados a seguir.

- i) Inoxidáveis martensíticos: São ligas de Fe + Cr que interceptam o campo austenítico no diagrama de fases, sendo possível o endurecimento por tratamento térmico de têmpera. Esse tipo de aço pode ser considerado equivalente aos aços para têmpera e revestimento, sendo a principal diferença o alto teor de cromo (SILVA, 1988).

Os efeitos metalúrgicos do alto teor de cromo no aço, são a diminuição da faixa de estabilidade da austenita, aumento da temperabilidade e aumento da resistência ao amolecimento no revenimento. Apesar destes aços serem empregados temperados e revenidos, as propriedades no estado recozido são de grande importância para a fabricação, onde a ductibilidade é importante. A tabela 2, apresenta as propriedades destes aços recozidos (SILVA, 1988).

Tabela 2 Propriedades mecânicas de inoxidáveis martensíticos recozidos.

AISI	Limite de Escoamento 0.2% (Mpa)	Limite de Resistência (MPa)	Along. em 50 mm (%)	R.A. (%)
410	285	530	25	70
416	280	530	30	60
420	350	670	25	55

Fonte: Silva, 1988

A soldabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos é limitada pela sua elevadíssima temperabilidade (STREICHER, 1977).

- ii) Inoxidáveis Ferríticos: São ligas de Fe + Cr essencialmente ferríticas e não endurecem por tratamento térmico de têmpera. São definidos como ferríticos os aços inoxidáveis cuja composição cai à direita do campo austenítico no diagrama Fe-Cr. Para a aplicação desse tipo de aço deve ser levada em consideração a resistência ao impacto, relativamente baixa e os problemas associados a sua soldagem (SILVA, 1988).
- iii) Inoxidáveis Austeníticos: Esse tipo de material pode ser classificado em austeníticos estáveis e austeníticos metaestáveis. Os austeníticos estáveis são os que retêm estruturas austenítica mesmo após grande deformação a frio. Os austeníticos metaestáveis transformam a estrutura para martensítica quando sujeitos à deformação a frio. A diferença entre os inoxidáveis martensíticos é visto de maneira

clara na curva tensão-deformação do material. Os aços 201, 202 e 301 de austenita metaestáveis apresentam as mais altas relações limites de resistência/limite de escoamento, sendo que os aços de austenita estável 304, e 310 também apresenta valores altos, conforme a tabela 3 (SILVA, 1988).

Tabela 3 Propriedades típicas de inoxidáveis austeníticos recozidos (ou solubilizados).

AISI	Limite de escoamento 0.2% (Mpa)	Limite de resistência (Mpa)	Along. em 50mm (%)	R.A. (%)
201	390	810	55	(Teste em chapas finas)
202	390	740	55	--
301	280	770	55	70
304	300	590	60	70
310	320	670	50	65

Fonte: Silva, 1988

2.5 Fosfatização

O fosfato é usado na indústria para tratar substratos como o ferro, aço, aço galvanizado, alumínio, entre outros. A maioria das carrocerias de automóveis são fosfatizadas com zinco antes da pintura para melhorar a adesão a tinta e aumentar a resistência a corrosão (OGLE e WOLPERS, 2003). A fosfatização é o processo que faz um pré-tratamento da superfície de metais ferrosos e não ferrosos (JEGANNATHAN et al, 2006). Esse tipo de tratamento ficou popular devido a capacidade de prevenção da corrosão subfilme através da melhora da adesão do acabamento orgânico, e outras aplicações como adesão de tinta e isolamento elétrico. Os revestimentos de fosfato mais usados na fosfatização são de zinco, ferro e manganês. (SHENG et al, 2011).

Conforme CAPE (1992), os fosfatos são classificados em duas classes, orgânicos e inorgânicos. Entre os inorgânicos, temos:

- Fosfato de zinco e mnióbio;
- Fosfato tricatiônico;
- Fosfato de zinco;

- Fosfato de ferro e
- Fosfato de manganês.

Segundo Camilo (2011), a fosfatização pode ser feita de 3 formas: Fosfato por spray, imersão e fosfato 3 em 1. A fosfatização 3 em 1 os principais componentes como desengraxante, decapante e fosfatizante são formulados junto e embalados no mesmo recipiente. Esse processo é relativamente simples e tem uma boa resistência anticorrosiva.

As reações envolvidas nos processos de fosfatização são basicamente as mesmas, pois envolvem o ácido fosfórico de fosfatos de ferro, zinco e manganês, além de processos como a oxidação com selênio (RICHARDSON, 1995).

Segundo Ogle e Wolpers (2003), existem quatro etapas importantes na sequência de fosfatização: limpeza, ativação ou condicionamento, fosfatização e enxágue. A fosfatização consiste principalmente em ácido fosfórico e cátions de metal bivalente.

A camada de fosfato é responsável por inibir processos corrosivos e constitui-se, em virtude da sua rugosidade, em excelente base para pintura garantindo a aderência da pintura. A superfície que receberá o revestimento de fosfato deve estar isenta de impurezas por isso o banho de desengraxe que é um estágio para remoção de óleos, gorduras e contaminantes é uma etapa importante do processo (ZEMPULSKI, 2008)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para análise da corrosão, foi utilizado os seguintes materiais listados abaixo:

- i) Aço médio carbono enegrecido 10x200 – O aço médio carbono utilizado é de classe de resistência 8.8, isto é, a tensão de ruptura do parafuso é de 80 kgf/mm^2 e a porcentagem de escoamento é 80% do valor de ruptura, ou seja, 64 kgf/mm^2 .

Figura 7 Parafuso aço carbono



Fonte: Elaborado pelo autor.

- ii) Aço Inoxidável 12x100 – O inoxidável utilizado no presente estudo é o parafuso sextavado de aço inoxidável austenítico AISI 304. Esse tipo de material tem porcentagem de cromo de 15 a 20% e níquel de 8 a 19 %, segundo a norma ISO 3506-1.

Figura 8 Parafuso aço inoxidável AISI 304



Fonte: Elaborado pelo autor.

- iii) Removedor de ferrugem – Para limpeza e desoxidação da superfície metálica dos parafusos, será utilizado o produto Quimox. Este produto é uma mistura de ácidos inorgânicos, sendo eles o ácido orto-fosfórico (CAS 7664-38-2) com concentração de no máximo 30% e o ácido clorídrico (CAS 7647-01-0) com concentração máxima de 10%

Figura 9 Quimox



Fonte: Elaborada pelo autor.

- iv) Oxidação preta F9 – O Oxi black será utilizado para a fosfatização dos parafusos de aço carbono. Este produto é composto por ácidos inorgânicos como o ácido orto-fosfórico (CAS 7664-38-2), ácido nítrico (CAS 7697-37-2), ácido selenioso (CAS 7783-00-8), ambos os três com valores de concentração de 10 a 20% e sulfato de cobre (CAS 7758-99-8) com concentração máxima de 10%.

Figura 10 Oxi Black F9



Fonte: Elaborado pelo autor.

- v) Desengripante – O desengripante é utilizado após a fosfatização para retardar o aparecimento de ferrugens.

Figura 11 Desengripante

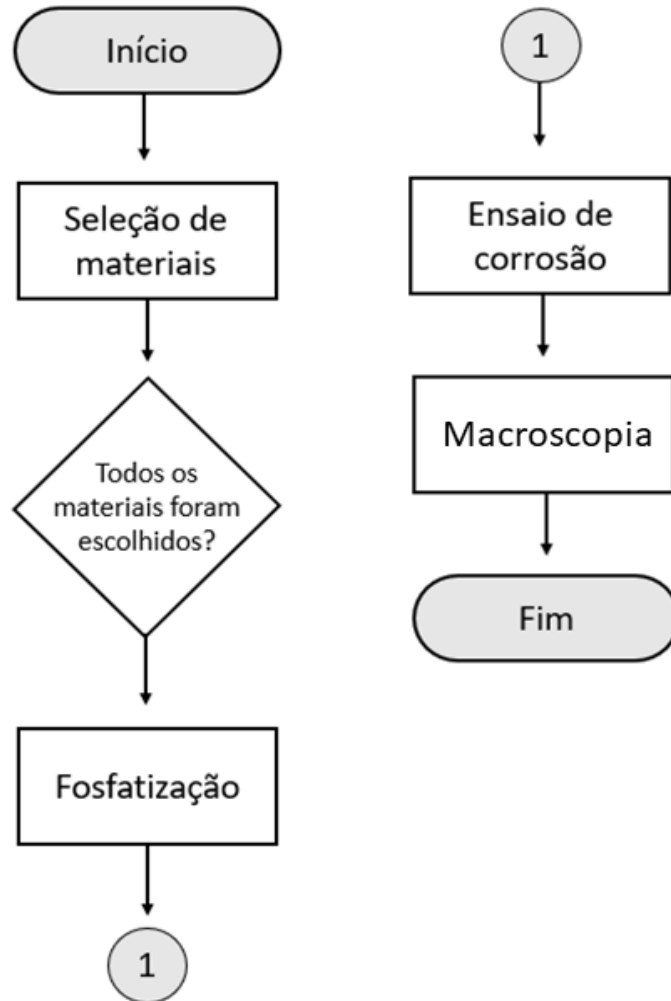


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 MÉTODO

Os testes em laboratório, seguiu conforme o fluxograma abaixo (figura 12).

Figura 12 Fluxograma de etapas de testes



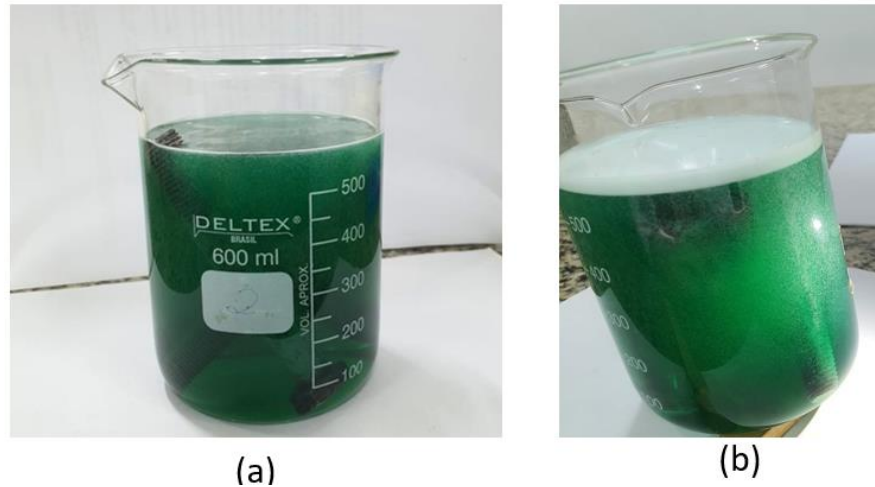
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a seleção de materiais, já mencionado anteriormente, foi realizado a fosfatização negra. Para a fosfatização, foi necessário fazer cinco etapas conforme especificadas no manual do kit oxidação.

a) Primeira Etapa – Limpeza

O objetivo dessa etapa foi a retirada de ferrugem, gorduras ou graxas. Para isso, foi utilizado o produto Quimox, esse produto foi colocado no becher junto com os parafusos (Figura 13(a)).

Figura 13 (a) Parafusos imersos no Quimox. (b) Parafusos após 15 minutos imerso no produto



Fonte: Elaborado pelo autor.

b) Segunda Etapa – Enxague

Decorrido 15 minutos imersos, os parafusos foram retirados e lavados em água destilada (figura 14) para neutralizar a ação do Quimox e após o enxague foram secos.

Figura 14 Enxague dos parafusos em água destilada

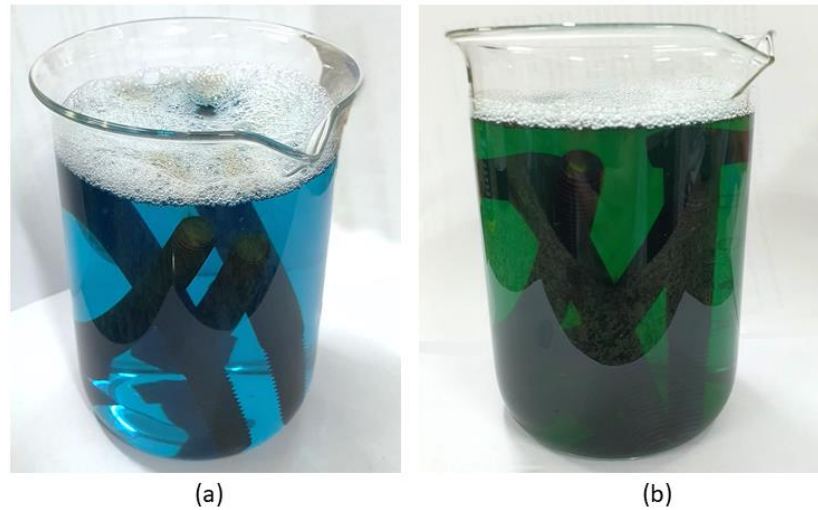


Fonte: Elaborado pelo autor.

c) Terceira Etapa – Fosfatização Negra

Após a limpeza e enxague, foi utilizado o Oxi black para a fosfatização negra (oxidação negra). Os parafusos foram imersos por aproximadamente 20 minutos. É possível perceber que a coloração do produto muda de azul para verde conforme o andamento da fosfatização (figura 15a e 15b).

Figura 15 Parafuso imerso no produto Oxi black. a) Parafuso imerso por 5 minutos. b) Parafuso imerso após 20 minutos



Fonte: Elaborado pelo autor.

d) Quarta Etapa - Enxague

Conforme o manual do produto Oxi black, após a fosfatização, é necessário o enxague com água destilada, do mesmo modo que a etapa dois para a neutralização do produto Oxi black.

Em seguida, foi medido a massa dos parafusos e os resultados estão incluídos na tabela 4. A massa medida antes da fosfatização e do ensaio de corrosão será comparada com a massa ao final dos testes.

Tabela 4 Massa inicial dos parafusos

Parafuso	Massa (g)	
	Aço Carbono	Aço Inoxidável
1	99,74	88,42
2	100,38	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

e) Quinta Etapa – Lubrificação

Conforme o manual do produto Oxi black, após a fosfatização, lavagem e secagem, foi utilizado o desengripante em toda a superfície do parafuso (fig. 16) para lubrificação e proteção da fosfatização negra e após 24 horas de descanso, foi iniciado o teste de corrosão.

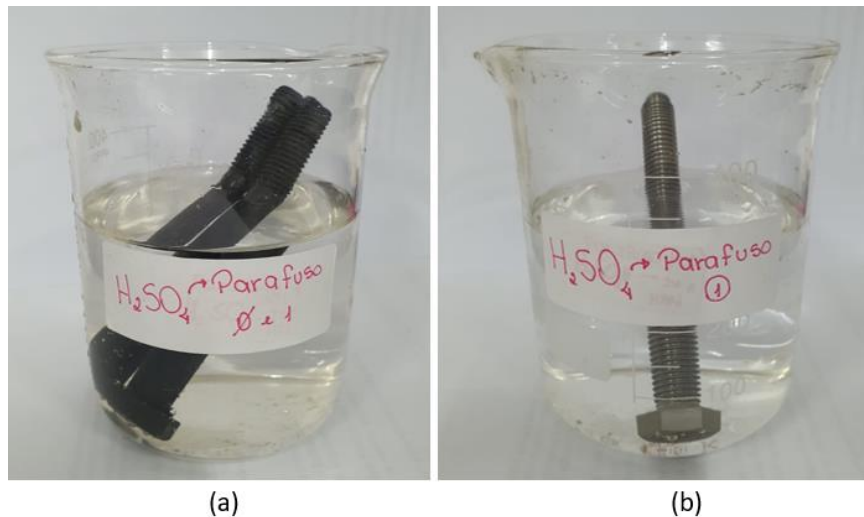
Figura 16 Parafusos com desengripante



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aguardado o período de 24 horas, foi iniciado os testes de corrosão. Para os testes, foi utilizado uma substância de H_2SO_4 , que simulará a corrosão proveniente de chuvas ácidas. Para preparo da substância, em concentração de 1N, foi necessário 26,6 ml de ácido sulfúrico, essa solução foi utilizada com alta concentração para acelerar o processo de corrosão em laboratório. Ambos os parafusos (aço inoxidável e aço carbono) foram colocados em bécher de 600ml, e imersos na substância (fig. 17a e 17b).

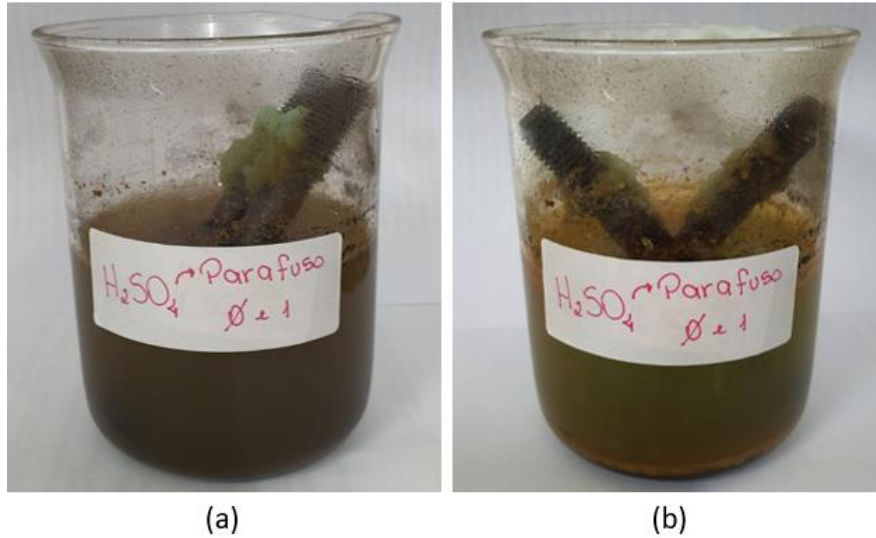
Figura 17 Aço carbono fosfatizado (a) e aço inoxidável (b) imersos em solução de H_2SO_4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao todo, os parafusos ficaram imersos na solução de ácido sulfúrico por 20 dias (fig. 18a e 18b) com temperatura média máxima de 29,5°C e mínima de 20,5°C.

Figura 18 (a) Parafuso de aço carbono após 11 dias. (b) Parafuso de aço carbono após 20 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No 20° dia dos testes de corrosão, o parafuso foi retirado e lavado com água destilada para neutralizar a ação da solução.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da corrosão em solução de H_2SO_4

Após vinte dias imerso em solução de H_2SO_4 , os parafusos de aço carbono (figura 19) apresentaram grande degradação da camada de fosfatização negra bem como a camada natural do parafuso em comparação com o parafuso de aço inoxidável AISI 304 (figura 20).

Figura 19 Corrosão do aço carbono



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 Corrosão do aço inoxidável



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível perceber, mesmo a olho nu, que o parafuso de aço inoxidável se manteve intacto de corrosão durante todo o tempo do teste, devido a proteção natural contra corrosão dos elementos de liga presentes na composição do material.

4.2 Análise macrográfica

Para análise, foi utilizado o microscópio estereoscópio SZ61 (figura 21) da marca Olympus com faixa de ampliação de 6,7 a 45x.

Figura 21 Esteoscópio SZ61 - Olympus



Fonte: Olympus

4.2.1 Parafuso em aço carbono

Através do estereoscópio, foi possível identificar o tipo de corrosão presente nos parafusos de aço carbono e avaliar a degradação presente no mesmo após os testes realizados em laboratório.

O parafuso 1 apresentou corrosão uniforme por toda a extensão do corpo do parafuso (figura 22 e 23), além de corrosão na parte da rosca (figura 24), mesmo que não tenha sido imersa na solução de H_2SO_4 . A corrosão uniforme é bastante comum, principalmente se o material for imerso em ácido.

Figura 22 Corpo do parafuso 1 após teste de corrosão



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 Corpo do parafuso 1 de aço carbono



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 Rosca do parafuso 1 de aço carbono



Fonte: Elaborado pelo autor

A cabeça do parafuso foi a área mais afetada, em sentido de degradação, perdendo toda a camada de fosfatização negra e parte do seu material (figura 25).

Figura 25 Corrosão na cabeça do parafuso 1 de aço carbono



Fonte: Elaborado pelo autor

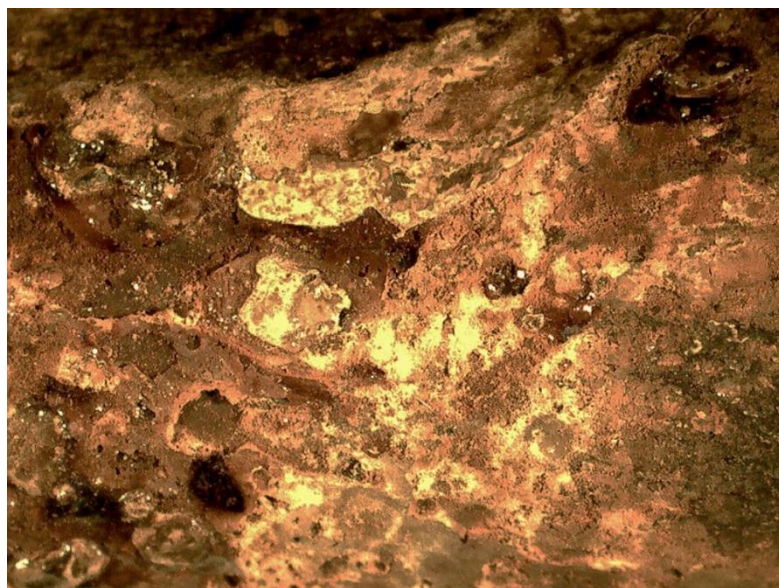
No parafuso 2 de aço carbono, é possível observar que a corrosão em alguns lugares foi mais abrangente do que o parafuso 1, mesmo ambos estando em condições iguais. O parafuso 2 também teve corrosão uniforme em todo o corpo (figura 26 e 27) e na cabeça do parafuso (figura 28).

Figura 26 Corpo do parafuso 2 após os testes de corrosão



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 Corrosão no corpo do parafuso 2 de aço carbono



Fonte: Elaborado pelo autor

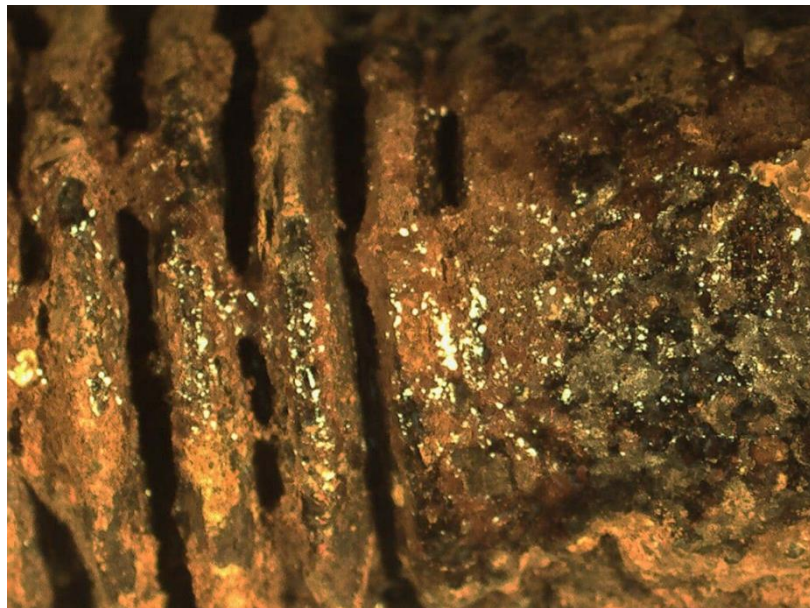
Figura 28 Cabeça do parafuso 2 após a corrosão



Fonte: Elaborado pelo autor

Através da imagem 29, é possível perceber que a rosca do parafuso 2 foi mais degradada em comparação à rosca do parafuso 1. Em algumas partes o material se juntou, tornando apenas um.

Figura 29 Rosca corroída do parafuso 2



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2. Parafuso em aço inoxidável

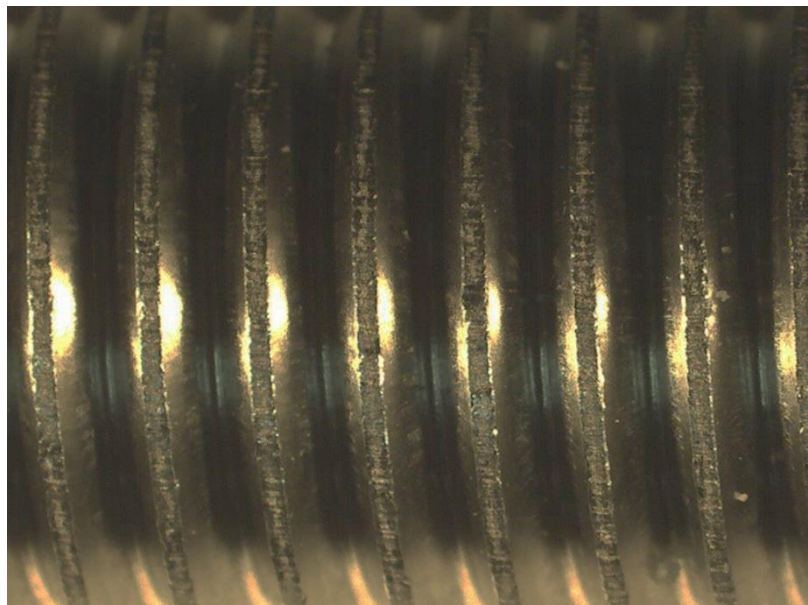
O parafuso em aço inoxidável, foi imerso em mesmas condições que os parafusos em aço carbono com o tratamento de fosfatização negra. Os parafusos ficaram imersos por 20 dias e ao final dos testes, o aço inoxidável (figura 30 e 31) não obteve nenhum traço de corrosão. A cabeça do parafuso também se manteve sem corrosão presente (figura 32).

Figura 30 Aço inoxidável após teste de corrosão



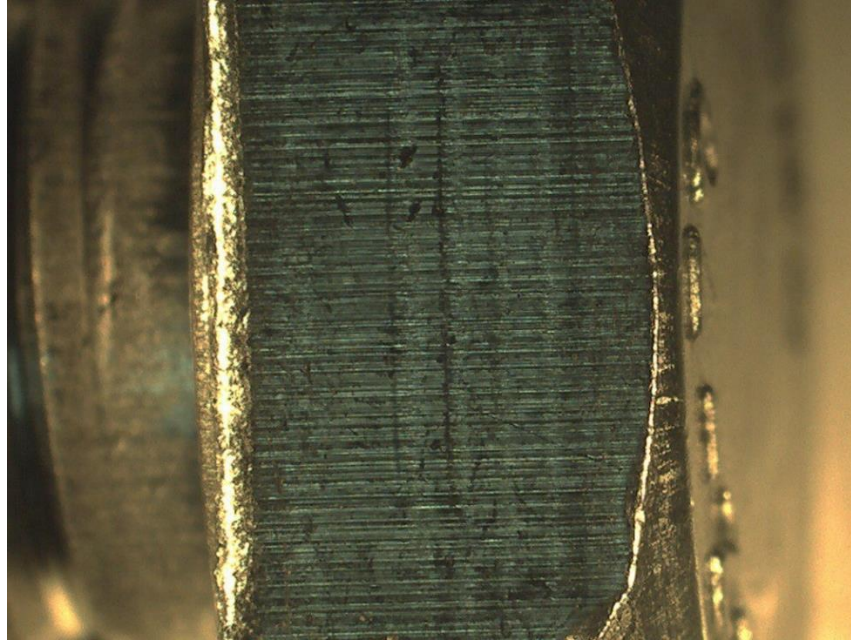
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31 Análise macrográfia do aço inoxidável após os testes de corrosão



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32 Cabeça do parafuso de aço inoxidável



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Perda de massa

Tabela 5 Massa inicial e final dos parafusos

Parafuso	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa inicial (g)	Massa final (g)
	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Inoxidável	Aço Inoxidável
1	99,74	90,72	88,42	88,42
2	100,38	90,80	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Na tabela 5, é possível identificar a perda de massa nos parafusos. Como foi utilizado apenas um parafuso em aço inoxidável, o valor para o parafuso 2 será 0.

Ao analisar a perda de massa dos dois tipos de parafuso, é possível perceber que o parafuso de aço inoxidável continuou com a mesma massa, antes e após os testes realizados em laboratório.

Os parafusos de aço carbono tiveram uma perda de massa significativa no período de 20 dias em que estiveram imersos. A perda de massa foi calculada pela diferença da massa inicial e final. O parafuso 1 teve uma perda de massa de 9,02g e o parafuso 2 teve perda de massa de 9,58g.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a oxidação negra (ou fosfatização negra), não teve um bom desempenho nos parafusos de aço carbono, visto o resultado obtido no ensaio de corrosão em meio ácido (simulando, de forma acelerada, chuva ácida).

Os parafusos de aço carbono apresentaram corrosão uniforme, já que a corrosão se deu em toda a superfície metálica do material, incluindo toda camada fosfatizada com oxidação negra.

O aço inoxidável se manteve íntegro durante todo o processo dos testes de corrosão, fato esse que se deve aos elementos de liga presentes na composição do material.

Esse tipo de fosfatização pode ser melhor elementos de em aço carbono que estão em meios menos propensos à corrosão ou situações menos exigentes da oxidação negra. Para situações onde necessita de melhores propriedades contra corrosão, o aço inoxidável será a melhor escolha.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Haroldo. Eletroquímica aplicada e corrosão, Universidade Federal do Paraná setor de tecnologia, Curitiba-PR, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. Revista Corrosão & Proteção. Ano 15, no 64, setembro/outubro 2018.

BARDAL, Einar. Corrosion and protection. Springer Science & Business Media, 2007.

BOND, S. Corrosion of Carbon Steel Weldments, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Vol 13A, ASM Handbook, ASM International, 2003, p 294– 300

BUCHWEISHAIJA, J. Phytochemicals as green corrosion inhibitors in various corrosive media: a review. Tanzania Journal of Science, v.35, 2009

CAMILO, Deise Mariana. Avaliação dos Parâmetros de Processo de Fosfatização Tricatiânica. Monografia para Graduação em engenharia Química. Escola de engenharia de Lorena, Lorena, 2011.

CAPE, Thomas W.; Chemfill Corporation ; Phosphate conversion coatings ; ASM Handbook ; Vo1.13ipp-869-882.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos. Abm, 1977

COBURN, Seymour K. Corrosion source book. 1984.

D'ALKAINE, C.V., FILHO, A. R., BOCCHI, N. & ROCHA, S. B., Corrosão e Proteção Pinturas Industriais, Editora UFSCar, 1988

DWIVEDI, Deepak; LEPKOVÁ, Kateřina; BECKER, Thomas. Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. **RSC advances**, v. 7, n. 8, p. 4580-4610, 2017.

Ficha de informação de segurança de produto química – FISPQ. Quimox Quimatic. Disponível em: https://www.quimatic.com.br/conteudo/fispq/FISPQ_QUIMOX.pdf. Acesso em 09 out. 2021.

Ficha de informação de segurança de produto química – FISPQ. Oxi black Quimatic. Disponível em: https://www.quimatic.com.br/conteudo/fispq/FISPQ_OXIBLACK_F9_F10.pdf. Acesso em 09 out. 2021.

FRANKEL, G.S. Pitting Corrosion, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Vol 13A, ASM Handbook, ASM International, 2003, p 236–241

GENTIL, Vicente. Corrosão. 6ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2011.

GERHARDUS, H. K.; VARNEY, J.; NEIL, T.; MOGHISSI, O.; GOULD, M.; PAYER, J. International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. NACE, 2016.

GUNES, I. Erdogan M e Çelik AG. Comportamento à corrosão e caracterização do aço AISI M2 com nitretação e boreto a plasma. Pesquisa de materiais. 2014; 17 (3): 612-618.
Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/x3vLFMSsqQh64FtqTCWTGPt/?lang=en>.
Acesso em 11 out. 2021

HAHIN, C.; BUCHHEIT, R. G. Filiform corrosion. 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produto Interno Bruto – PIB IBGE. Disponível em: Acesso em: 15 jul. 2021.

ISO 3506-1. ISO, E. N. 3506-1. Mechanical properties of corrosion-resistant stainless-steel fasteners–Part 1: Bolts, screws and studs (ISO 3506, v. 1, 1997. Disponível em: <http://www.bsf-sh.com/upload/file/20160601/20160601090581068106.pdf>. Acesso em: 30 set. 2021

JAMBO, Hermani C. M; FÓFANO, Sócrates. Corrosão – Fundamentos, monitoração e controle. Editora Ciência Moderna. Rio de Janeiro, 2008.

JEGANNATHAN S, SANKARA NARAYANAN TSN, et al., Formação de revestimentos compostos de fosfato de zinco-zinco por tratamento eletroquímico catódico. Tecnologia de Superfície e Revestimentos. 2006; 200 (12-13): 4117-4126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.04.022>

K. Ogle, and M. Wolpers, Phosphate Conversion Coatings, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Vol 13A, ASM Handbook, ASM International, 2003, p 712– 719

MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPIO OLYMPUS. Disponível em: <https://www.olympus-lifescience.com/pt/microscopes/stereo/sz61/>. Acesso em: 01 nov. 2021

VELEVA, L. KANE, R.D. Atmospheric Corrosion, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Vol 13A, ASM Handbook, ASM International, 2003, p 196–209

PANNONI. D.F Aços Estruturais. Gerdau, artigos e arquivos técnicos desenvolvidos sobre a indústria do aço, 2006.

PASKO, M.; DE APLICAÇÃO, E. Análise comparativa entre Aço Inoxidável e Aço Carbono Revestido Corrosão e Opções de Materiais para Elementos de Fixação. Disponível em: https://www.spirol.com/library/whitepapers/Analise_Comparativa_Entre_Aco_Inoxidavel_e_Aco_Carbono_Revestido_br.pdf. Acesso em 29 set. 2021

REVIE, R. Winston. Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering. John Wiley & Sons, 2008.

RICHARDSON, M.O.W.; SHAW, R.E. Phosphate coatings. In: SHEIR, L.L., et.al. Corrosion. Butterworth : Heinemann, 1995, v.2. cap.15, p.22-37.

SHENG, M, Wang Y, Zhong Q, Wu H, Zhou Q e Lin H. Os efeitos do aditivo nano-SiO₂ na fosfatização de zinco do aço carbono. Tecnologia de Superfície e Revestimentos. 2011; 205 (11): 3455- 3460.

SHI, C., et al., Influence of submicron-sheet zinc phosphate synthesised by sol-gel method on anticorrosion of epoxy coating, Prog. Org. Coat. 117 (2018) p. 102–117.

SILVA, A. L. C.; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. 2ª edição. Sumaré-SP. Editora Eletrometal SA Metais Especiais, 1988.

STREICHER, M. A. Stainless Steels 77, ed. RQ Barr, Clímax Molibdénium Co, London, p. 1, 1977.

ZEMPULSKI, Ladislau Nelson; ZEMPULSKI, Marina Fernanda Stocco. Oxidação negra. 2008.