

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA CORROSÃO DE ELEMENTOS DE FIXAÇÃO EM TUBULAÇÕES EM  
UMA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**JEFERSON RODRIGUES SOUTO**

RIO GRANDE, RS

2022

**JEFERSON RODRIGUES SOUTO**

**ANÁLISE DA CORROSÃO DE ELEMENTOS DE FIXAÇÃO EM TUBULAÇÕES EM  
UMA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do Rio  
Grande-FURG como requisito para obtenção  
do título de “Mestre em Engenharia Mecânica”  
– Área de Concentração: Engenharia de  
Fabricação”

Orientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl

RIO GRANDE, RS

20202

## Ficha Catalográfica

S728a Souto, Jeferson Rodrigues.

Análise da corrosão de elementos de fixação em tubulações em uma Indústria de Fertilizantes / Jeferson Rodrigues Souto. – 2022.  
70 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2022.

Orientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

1. Elementos de fixação 2. Corrosão 3. Indústria Fertilizantes  
I. Biehl, Luciano Volcanoglo II. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**  
**PPMec**



Ata nº **4/2022** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos nove dias do mês de março de dois mil e vinte e dois, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às treze horas e trinta minutos, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **Jeferson Rodrigues Souto**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa engenharia de soldagem e materiais, com o seguinte título: **ANÁLISE DA CORROSÃO DE ELEMENTOS DE FIXAÇÃO EM TUBULAÇÕES EM UMA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**. Referendado pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl, Jorge Luis Braz Medeiros e José de Souza. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Luciano Volcanoglo Biehl: **APROVADO**
2. Jorge Luis Braz Medeiros: **APROVADO**
3. José de Souza: **APROVADO**

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente  
Luciano Volcanoglo Biehl  
Data: 09/03/2022 13:39:12-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

1. \_\_\_\_\_

CPF: 575.195.100-00

Documento assinado digitalmente  
gov.br JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS  
Data: 09/03/2022 15:31:46-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

2. \_\_\_\_\_

CPF: 588.871.210-87

Documento assinado digitalmente  
gov.br JOSE DE SOUZA  
Data: 09/03/2022 15:22:35-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

3. \_\_\_\_\_

CPF: 914.626.140-00

Documento assinado digitalmente  
gov.br JEFERSON RODRIGUES SOUTO  
Data: 10/03/2022 14:31:51-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Jeferson Rodrigues Souto: \_\_\_\_\_

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha mãe,  
Selai Rodrigues Souto (in memorian),  
que sempre me apoiou e foi exemplo  
de força e determinação. Te amo mãe!*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Selai e Nelson, os quais sem o seu suporte desde meus primeiros passos e o grande incentivo à busca por educação jamais teria a possibilidade de realizar este trabalho.

Agradeço à Camila, minha esposa, minha maior incentivadora para realização deste mestrado. Tua ajuda, amor e parceria durante todo o período de realização deste trabalho foi fundamental para conseguir chegar até aqui.

À Júlia, minha filha, que é energia para encarar meus maiores desafios e adversidades e me enche de força através do seu sorriso, espontaneidade e alegria contagiante.

Agradeço ao meu orientador, o engenheiro e professor Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, o qual sem o seu suporte e ajuda na estratégia de condução não seria possível a conclusão deste trabalho em um período tão conturbado o qual está sendo este tempo de pandemia de covid-19.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande, a minha querida FURG, universidade a qual tenho contato desde 2003, quando ainda novo ingressei no antigo Colégio Técnico Industrial – CTI, universidade onde me formei Engenheiro Mecânico e hoje tenho a possibilidade de realizar meu mestrado.

Por fim, agradeço aos meus colegas de trabalho que colaboraram durante a realização da fase experimental deste estudo.

## RESUMO

A corrosão de parafusos, porcas e arruelas em uniões flangeadas de tubulações na indústria de fertilizantes trata-se de um grande problema que pode gerar indisponibilidade de equipamentos da fábrica, comprometer a segurança operacional, integridade ambiental, além de gerar alta improdutividade e prejuízos quando é necessário executar manutenção nas linhas. Diante disso, neste trabalho foi realizada uma análise sobre a corrosão apresentada nos elementos de fixação utilizados de aço carbono e especificado dois materiais alternativos para aplicação: revestidos com xylan 1070 e com xylan 1010. Os ensaios de corrosão foram realizados sob condições de serviço, permitindo, portanto, uma avaliação fidedigna da ação do meio corrosivo. Foram utilizadas inspeções visuais e análise da taxa de corrosão por perda de massa dos componentes. O ganho estimado com a troca dos materiais dos fixadores foi de cerca de 500 mil reais ao ano em função do aumento da vida útil dos componentes e consequente redução das paradas de planta, além dos ganhos indiretos gerados a partir da eliminação da corrosão e por consequência dos vazamentos existentes nas linhas.

**Palavras-chave:** Elementos de fixação; corrosão; indústria fertilizantes.

## **ABSTRACT**

The corrosion of screws, nuts and washers in flanged connections of pipes in the fertilizer industry is a major problem that can lead to unavailability of plant equipment, compromise operational safety, environmental integrity, in addition to generating high unproductivity and losses when it is necessary to perform maintenance on the lines. Therefore, in this work an analysis was carried out on the corrosion presented in the used carbon steel fasteners and two alternative materials were specified for application: coated with xylan 1070 and with xylan 1010. The corrosion tests were carried out under service conditions, allowing , therefore, a reliable evaluation of the action of the corrosive medium. Visual inspections and analysis of the corrosion rate due to loss of mass of the components were used. The estimated gain with the replacement of fastener materials was around 500 thousand reais per year due to the increase in the useful life of the components and consequent reduction of plant downtime, in addition to the indirect gains generated from the elimination of corrosion and, consequently, of leaks in the lines.

**Keywords:** Screws; corrosion; fertilizer industry

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Mecanismo de corrosão do aço .....                                                                                                        | 19 |
| Figura 2: Mecanismo de corrosão intersticial entre duas chapas.....                                                                                 | 21 |
| Figura 3: Mecanismo de corrosão por frestas em união parafusada.....                                                                                | 22 |
| Figura 4: Comparação de custos de galvanização mecânica e galvanoplastia .....                                                                      | 25 |
| Figura 5: Barra de teste com parafusos .....                                                                                                        | 26 |
| Figura 6: Imagens após a realização do ensaio .....                                                                                                 | 26 |
| Figura 7: Taxa de corrosão do aço carbono em função do teor de carbono .....                                                                        | 28 |
| Figura 8: Taxa de corrosão em função da concentração de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> para aço carbono com quantidades diferentes de carbono ..... | 29 |
| Figura 9: Ilustração esquemática da prevenção de canais de hidrogênio .....                                                                         | 31 |
| Figura 10: Localização da fábrica em estudo .....                                                                                                   | 32 |
| Figura 11: Fluxograma da planta de acidulação.....                                                                                                  | 33 |
| Figura 12: Alterações geométricas dos elementos de fixação .....                                                                                    | 35 |
| Figura 13: Estrutura analítica experimental.....                                                                                                    | 37 |
| Figura 14: Conjunto de fixação original .....                                                                                                       | 38 |
| Figura 15: Local de instalação dos componentes .....                                                                                                | 39 |
| Figura 16: Alterações geométricas dos elementos de fixação geral .....                                                                              | 40 |
| Figura 17: Alterações geométricas dos elementos de fixação destaque.....                                                                            | 41 |
| Figura 18: Elementos de fixação com xylan 1070 .....                                                                                                | 44 |
| Figura 19: Especificações dos elementos de fixação xylan 1070.....                                                                                  | 44 |
| Figura 20: Elementos de fixação com xylan 1010 .....                                                                                                | 45 |
| Figura 21: Dados cadastro elementos de teste - parafuso.....                                                                                        | 46 |
| Figura 22: Dados cadastro elementos de teste - porca.....                                                                                           | 47 |
| Figura 23: Dados cadastro elementos de teste - arruela.....                                                                                         | 47 |
| Figura 24: Requisições de compra.....                                                                                                               | 48 |
| Figura 25: Elementos de fixação dos testes.....                                                                                                     | 49 |
| Figura 26: Montagem dos elementos de teste em campo - Visão geral.....                                                                              | 50 |
| Figura 27: Montagem dos elementos de teste em campo - Flange.....                                                                                   | 50 |
| Figura 28: Montagem dos elementos de teste em campo - Montagem.....                                                                                 | 51 |
| Figura 29: Elementos de fixação após os testes - Vista geral.....                                                                                   | 53 |
| Figura 30: Elementos de fixação após os testes - Xylan 1070.....                                                                                    | 53 |
| Figura 31: Elementos de fixação após os testes - Xylan 1010 .....                                                                                   | 54 |

Figura 32: Pesagem dos elementos de fixação..... 54

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Resumo das vantagens e desvantagens das diferentes técnicas de deposição de revestimento .....                    | 23 |
| Tabela 2: Comparações de métodos de deposição de revestimento de fixadores ...                                              | 24 |
| Tabela 3: Taxas de corrosão (mm y <sup>-1</sup> ) do aço carbono e aços inoxidáveis em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ..... | 28 |
| Tabela 4: Especificação dos elementos de fixação .....                                                                      | 34 |
| Tabela 5: Pesagem dos elementos de fixação originais .....                                                                  | 38 |
| Tabela 6: Perda de massa por corrosão .....                                                                                 | 40 |
| Tabela 7: Análise Físico-Química da amostra .....                                                                           | 42 |
| Tabela 8: Resultados dos testes dos elementos de teste .....                                                                | 52 |
| Tabela 9: Eventos de quebras por falhas devido a corrosão em elementos de fixação .....                                     | 55 |
| Tabela 10: Estimativa perda de produção por hora .....                                                                      | 61 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|      |                                                              |
|------|--------------------------------------------------------------|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas                     |
| FURG | Universidade Federal do Rio Grande                           |
| NBR  | Norma Técnica Brasileira                                     |
| IVD  | Deposição de íons de vapor                                   |
| PRFV | Polímero Reforçado com Fibra de Vidro                        |
| SAP  | Sistemas, Aplicativos e Produtos para processamento de dados |
| DEM  | Disponibilidade Eletro-Mecânica                              |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i>            |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                                                 |                                    |
|-------------------------------------------------|------------------------------------|
| Fe                                              | Ferro                              |
| O <sub>2</sub>                                  | Oxigênio                           |
| H <sub>2</sub> O                                | Água                               |
| FeOOH                                           | Hematita hidratada                 |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                  | Magnetita                          |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                  | Ácido sulfúrico                    |
| Cl                                              | Cloro                              |
| H                                               | Hidrogênio                         |
| M                                               | Metal hipotético                   |
| <i>n</i>                                        | Número de valência                 |
| FeSO <sub>4</sub>                               | Sulfato ferroso                    |
| H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>                 | Ácido Fluossilícico                |
| HF                                              | Ácido Fluorídrico                  |
| SiO <sub>2</sub>                                | Sílica ou amorfa ou cristalina     |
| Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> | Rocha fosfática - mineral complexo |
| Ton                                             | Tonelada                           |
| h                                               | Hora                               |
| mm                                              | Milímetro                          |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                        | <b>15</b> |
|          | OBJETIVOS GERAIS .....                                                         | 16        |
|          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                    | 16        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                             | <b>17</b> |
| 2.1      | Ataque corrosivo em elementos de fixação na indústria de fertilizantes .....   | 17        |
| 2.1.1    | Corrosão atmosférica em fixadores de aço carbono .....                         | 18        |
| 2.1.2    | Corrosão por frestas em uniões flangeadas .....                                | 20        |
| 2.2      | Comparativo entre técnicas atuais de revestimento de elementos de fixação .... | 22        |
| 2.3      | Trincas por corrosão de sulfeto em parafusos de alta resistência .....         | 25        |
| 2.4      | Corrosão de tubos e tanques de aço carbono por ácido sulfúrico concentrado ..  | 27        |
| 2.4.1    | Mecanismos de corrosão do aço carbono no ácido sulfúrico .....                 | 28        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                | <b>32</b> |
| 3.1      | Local do experimento .....                                                     | 32        |
| 3.2      | Análise da corrosão dos elementos de fixação utilizados na fábrica .....       | 34        |
| 3.3      | Análise do ambiente de teste .....                                             | 34        |
| 3.4      | Escolha de materiais alternativos .....                                        | 35        |
| 3.5      | Análise da corrosão do elemento de fixação proposto .....                      | 35        |
| 3.6      | Estimativas de ganho .....                                                     | 36        |
| 3.7      | Estrutura analítica experimental .....                                         | 36        |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>                                | <b>38</b> |
| 4.1      | Análise dos elementos de fixação utilizados .....                              | 38        |
| 4.2      | Análise do ambiente instalado .....                                            | 42        |
| 4.3      | Materiais alternativos para aplicação .....                                    | 43        |
| 4.3.1    | Aço inox 316 .....                                                             | 43        |

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.2 Aço carbono revestido com xylan 1070 (vermelho).....      | 43        |
| 4.3.3 Aço carbono revestido com xylan 1010 (azul) .....         | 45        |
| 4.4 Cadastramento e parametrização .....                        | 45        |
| 4.5 Instalação dos elementos de fixação propostos .....         | 48        |
| 4.5.1 Perda de massa .....                                      | 51        |
| 4.6 Perdas causadas pela corrosão dos elementos de fixação..... | 55        |
| 4.7 Estimativa de ganho .....                                   | 60        |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>                                       | <b>62</b> |
| <b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                 | <b>63</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS .....</b>                                     | <b>64</b> |
| <b>8. APÊNDICE A.....</b>                                       | <b>67</b> |
| <b>9. APÊNDICE B.....</b>                                       | <b>68</b> |
| <b>10. APÊNDICE C.....</b>                                      | <b>69</b> |
| <b>11. ANEXOS.....</b>                                          | <b>70</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria metal mecânica a rotina de manutenção dos equipamentos é uma atividade de fundamental importância na garantia da produtividade e competitividade das empresas e têm se destacado na estratégia de negócios e tomada de decisões da alta direção. (KARDEC, 2004).

Devido à grande competitividade dos modelos de negócios atuais, a gestão de ativos tem tomado grande relevância. A procura constante na maximização dos lucros, visando a redução de custos e aumento da produtividade, faz com que as empresas adotem rotinas de manutenção que garantam o planejamento de paradas e a longevidade de seus equipamentos. Buscando, assim, uma forma de mitigar perdas produtivas e paradas inesperadas. De acordo com Moubray (2000), o velho paradigma da manutenção tinha como objetivo a otimização da disponibilidade da fábrica ao custo mínimo, já no novo paradigma, a manutenção afeta todos os aspectos do negócio: segurança, integridade ambiental, eficiência energética e qualidade do produto.

Nesse contexto, destaca-se que a corrosão dos elementos de fixação em tubulações na indústria de fertilizantes trata-se de um tema de grande relevância na área de manutenção, já que pode gerar diversos problemas como a indisponibilidade de equipamentos da fábrica, o comprometimento da segurança operacional e da integridade ambiental, além de gerar alta improdutividade e prejuízos, quando é necessário executar manutenção nas linhas, haja visto que faz-se necessário cortar os parafusos e substituir todos os componentes de fixação. A esse respeito, ressalta-se a relevância prática do presente estudo, uma vez que é uma temática emergente na área de manutenção da indústria de fertilizantes.

Além disso, a elaboração deste trabalho justifica-se pela ausência de uma literatura vasta sobre o assunto, sendo incipientes os estudos envolvendo a temática em questão. Assim, pesquisas nesse contexto sinalizam para possíveis contribuições no plano teórico.

Tendo por base esses argumentos, o tema central do presente estudo foi definido como a análise da corrosão de elementos de fixação em tubulações em uma indústria de fertilizantes situada na cidade de Rio Grande, estado do Rio Grande do sul.

## **OBJETIVOS GERAIS**

O objetivo geral deste estudo é propor um material alternativo para os parafusos, porcas e arruelas utilizados que apresente melhores características à corrosão do que os utilizados atualmente dentro dos custos disponíveis para tal aplicação.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para atingir o disposto no objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar o comportamento dos elementos de fixação que são utilizados atualmente quanto à corrosão;
- b) Analisar o meio em que os elementos de fixação estão inseridos;
- c) Compreender de que forma se dá a corrosão nos elementos de fixação utilizados;

Especificar e testar dentro do ambiente da fábrica elementos de fixação fabricados com materiais alternativos com revestimento de que apresentem melhores características quanto à corrosão;

- d) Medir o ganho financeiro para empresa com a troca dos elementos de fixação, baseado na redução de paradas de fábrica e manutenções corretivas nas linhas.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta seção do trabalho serão apresentadas as teorias e estudos empíricos que dão suporte ao estudo desenvolvido.

### **2.1 ATAQUE CORROSIVO EM ELEMENTOS DE FIXAÇÃO NA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**

A união entre componentes mecânicos com a utilização de parafusos, porcas e arruelas é amplamente utilizada principalmente no setor automotivo, aeroespacial, predial e indústria. No entanto, existe uma grande dificuldade no combate à corrosão destes elementos, o que acaba por vezes, dificultando sua aplicação. Com a corrosão, podem ocorrer alterações geométricas nos elementos de fixação, fazendo com que o torque aplicado ao conjunto seja diminuído, podendo vir a causar danos catastróficos a esta união. Nesse sentido, Krüger e Mandel (2011) expõe que os problemas típicos dos elementos de fixação durante sua utilização estão intimamente ligados à corrosão atmosférica, corrosão galvânica, corrosão por frestas e fragilização por hidrogênio.

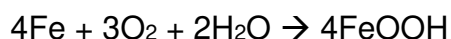
A corrosão atmosférica é um dos processos mais comuns, pois a grande maioria das estruturas expostas a atmosfera é metálica. Ela ocorre quando se forma uma fina película de eletrólito sobre a superfície do metal, o que possibilita o ataque do tipo eletroquímico. A película é formada devido à presença de umidade na atmosfera. Outros componentes presentes na atmosfera do ambiente ao qual o metal está exposto afetam a corrosividade do meio, tais como, gases, vapores, poluentes, vazamentos, entre outros. (WOLYNEC et al., 1992). Já a corrosão galvânica, ocorre no contato de materiais diferentes, por exemplo, na montagem de elementos de fixação de aço de alta resistência e liga de alumínio, na presença de um meio condutor ou eletrólito aumenta o risco de corrosão galvânica devido à grande diferença de potenciais eletroquímicos desses materiais (KRUGER; MANDEL, 2011; CALABRESE et al., 2015). Na corrosão por frestas, ocorre um ataque a uma superfície de metal na fenda entre duas superfícies de interligação, que geralmente ocorre na folga entre o elemento de fixação e as chapas de metal à qual os elementos estão unindo, devido à diferença entre a concentração de

eletrólitos dentro a fenda (redução de oxigênio) e fora da fenda (abundante oxigênio) (DAVIS, 2000). Já, a fragilização por hidrogênio ocorre quando o fixador de aço de alta resistência está sob tensão e falha mesmo que a tensão aplicada seja muito menor que a resistência ao escoamento do aço, porque da presença de hidrogênio (COTTIS, 2010).

Diante do exposto, pode-se verificar que neste estudo os tipos de corrosão predominantes são a corrosão atmosférica e a corrosão por frestas, haja visto que o ambiente em que os elementos de fixação estão instalados possuem produtos corrosivos oriundos do processo de fabricação de fertilizantes e frestas se formam na união dos flanges de tubulação industrial. Sendo assim, seus mecanismos serão revistos para melhor entendimento do fenômeno e subsidiar a tomada de decisão na escolha do melhor elemento de fixação para a aplicação.

### **2.1.1 CORROSÃO ATMOSFÉRICA EM FIXADORES DE AÇO CARBONO**

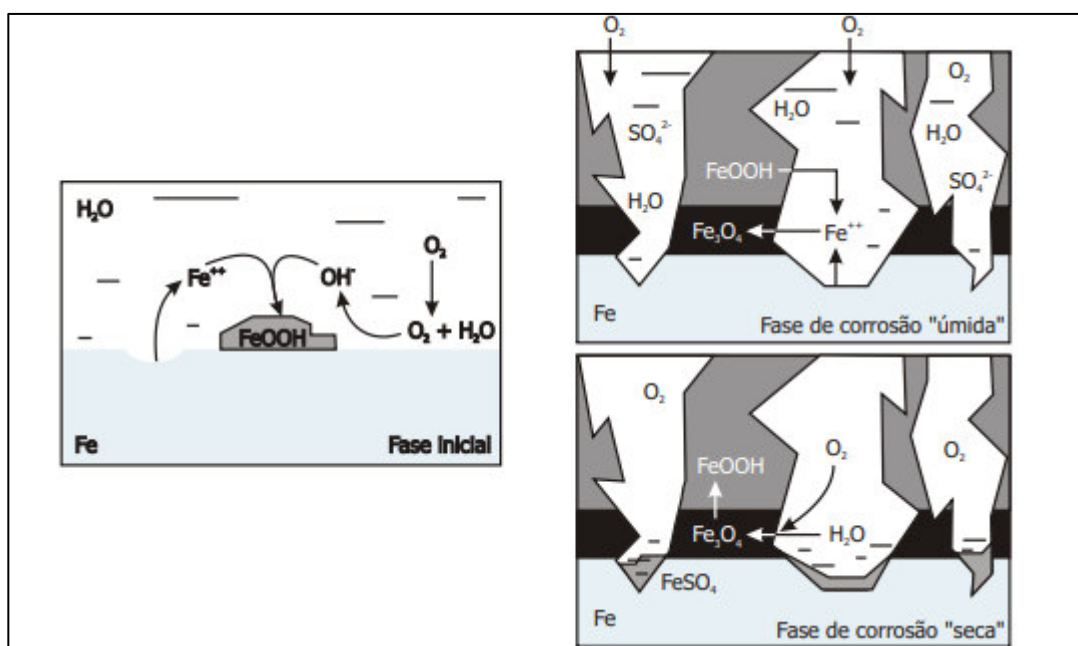
A corrosão atmosférica do aço carbono pode ser descrita esquematicamente pela reação:



O composto FeOOH, que pode ser considerado como sendo hematita hidratada ( $2\text{FeOOH} \leftrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ), designa de modo genérico a ferrugem, que é uma mistura complexa de várias fases cristalinas e amorfas de óxidos e hidróxidos e de ferro, cuja estequiometria corresponde aproximadamente à fórmula global FeOOH. Os três principais componentes da ferrugem são, respectivamente, a lepidocrocita, de estrutura romboédrica, a goethita, de estrutura também romboédrica e a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), de estrutura cúbica. A composição da ferrugem varia em função das condições climáticas e da duração da exposição. Ela varia morfológicamente e quimicamente do interior para o exterior da camada. A parte exterior é geralmente porosa, desagregada e quebradiça, sendo constituída principalmente de goethita e lepidocrocita. Já, a parte interior, adjacente ao metal, é, em geral, relativamente densa e mais aderente, sendo formada por magnetita e fases amorfas de FeOOH (PANNONI, 2007).

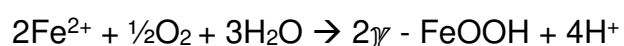
Quando a superfície de aço é exposta à atmosfera, ela é rapidamente recoberta por uma fina camada de produtos de corrosão. Esta reação acontece tão mais rapidamente quanto mais contaminada for a superfície pelos poluentes existentes, tais como os íons cloreto. Inicialmente, o oxigênio contido no ar difunde através da película líquida, e é reduzido a íons  $\text{OH}^-$  na superfície metálica, enquanto o ferro é oxidado a íon  $\text{Fe}^{2+}$ , que passa a ser solução no eletrólito (figura 1).

Figura 1: Mecanismo de corrosão do aço

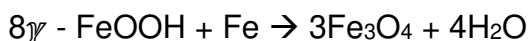


Fonte: Pannoni, 2007.

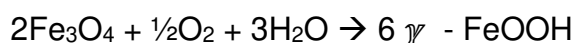
Os íons ferrosos em solução reagem com as hidroxilas, formando, após uma série de reações, a  $\gamma$ -FeOOH segundo a reação:



Desta forma, a camada de lepidocrocita desenvolve-se, recobrando a superfície, levando à diminuição dos sítios ativos onde ocorre a oxidação do ferro a íon ferroso. Em paralelo, a difusão do oxigênio é limitada pela barreira de lepidocrocita formada. Quando a concentração de oxigênio se torna suficientemente pequena, a lepidocrocita reage, por sua vez, com os íons  $\text{Fe}^{2+}$  em fase aquosa, gerando uma camada de magnetita segundo a reação:



A ferrugem  $\gamma$  -FeOOH se comporta, dessa forma, como um oxidante em relação ao ferro, do mesmo modo que o oxigênio. De acordo com a equação acima, a reação deverá parar quando toda a ferrugem for consumida, mas, de fato, a redução do  $\gamma$  -FeOOH não acontece quando o teor de oxigênio é pequeno. Durante as fases “secas”, onde a película de água é bastante fina e a concentração de oxigênio é alta, a magnetita reage com o oxigênio do ar de acordo com a reação abaixo:

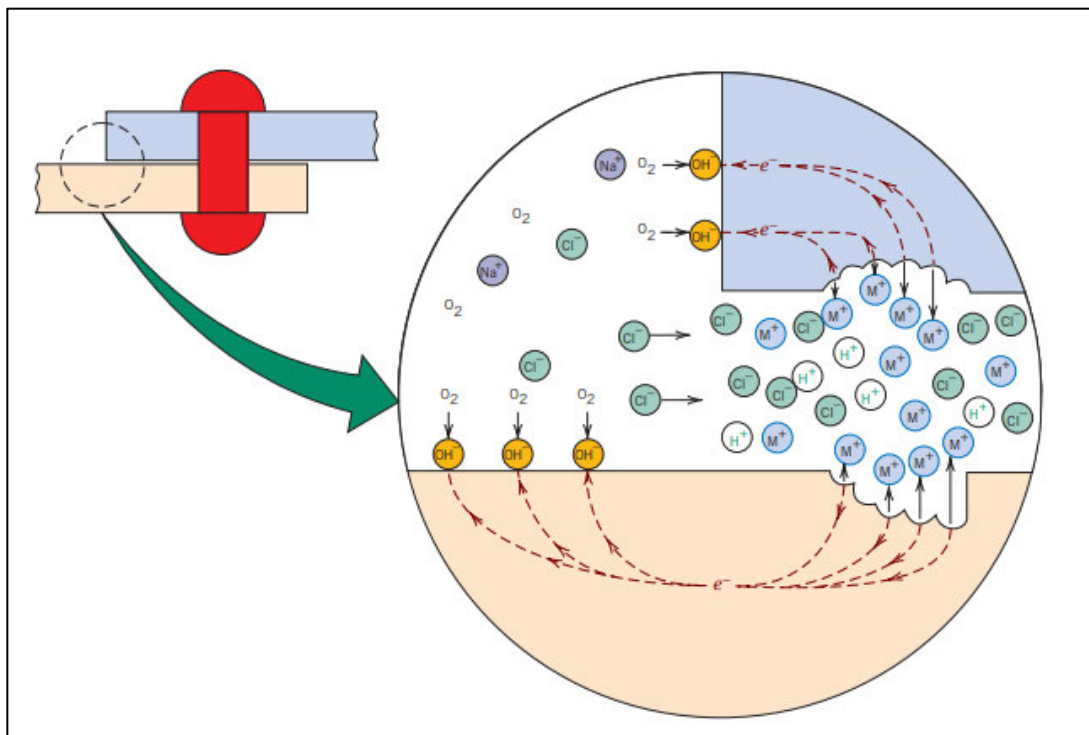


Assim, se observa um fenômeno cíclico entre as fases “úmidas” e “secas”, levando à transformação da lepidocrocita em magnetita, com o consumo do metal durante a fase úmida. Se poluentes tais como o  $\text{SO}_4^{2-}$  estiverem presentes na fase aquosa, o consumo de metal será acelerado na fase “úmida”, havendo a precipitação de  $\text{FeSO}_4$  no fundo da cela de corrosão durante a fase “seca”. Os ciclos de umedecimento e secagem alternados exercem, desse modo, uma forte influência na velocidade média de corrosão do aço (PANNONI, 2007).

### 2.1.2 CORROSÃO POR FRESTAS EM UNIÕES FLANGEADAS

Segundo Callister e Rethwisch (2012), a corrosão eletroquímica também pode ocorrer como consequência das diferenças de concentração de íons ou gases dissolvidos na solução eletrolítica entre duas regiões da mesma peça de metal. Para uma célula de concentração, ocorre corrosão na localidade que tem a menor concentração. Um exemplo desse tipo de corrosão ocorre em fendas e recessos ou sob depósitos de sujeira ou produtos de corrosão onde a solução fica estagnada e há um esgotamento localizado do oxigênio dissolvido. A corrosão que ocorre preferencialmente nessas posições é chamada de corrosão por fendas. A fenda deve ser larga o suficiente para a solução penetrar, mas estreita o suficiente para estagnação. Geralmente a largura é de vários milésimos de polegada. O mecanismo proposto para a corrosão de fendas é ilustrado na abaixo (figura 2).

Figura 2: Mecanismo de corrosão intersticial entre duas chapas

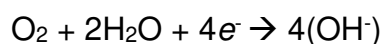


Fonte: Callister, 2012.

Depois que o oxigênio se esgota dentro da fenda, a oxidação do metal de acordo com a reação abaixo, onde o metal hipotético  $M$  que tem uma valência de  $n$  sofre a seguinte reação:



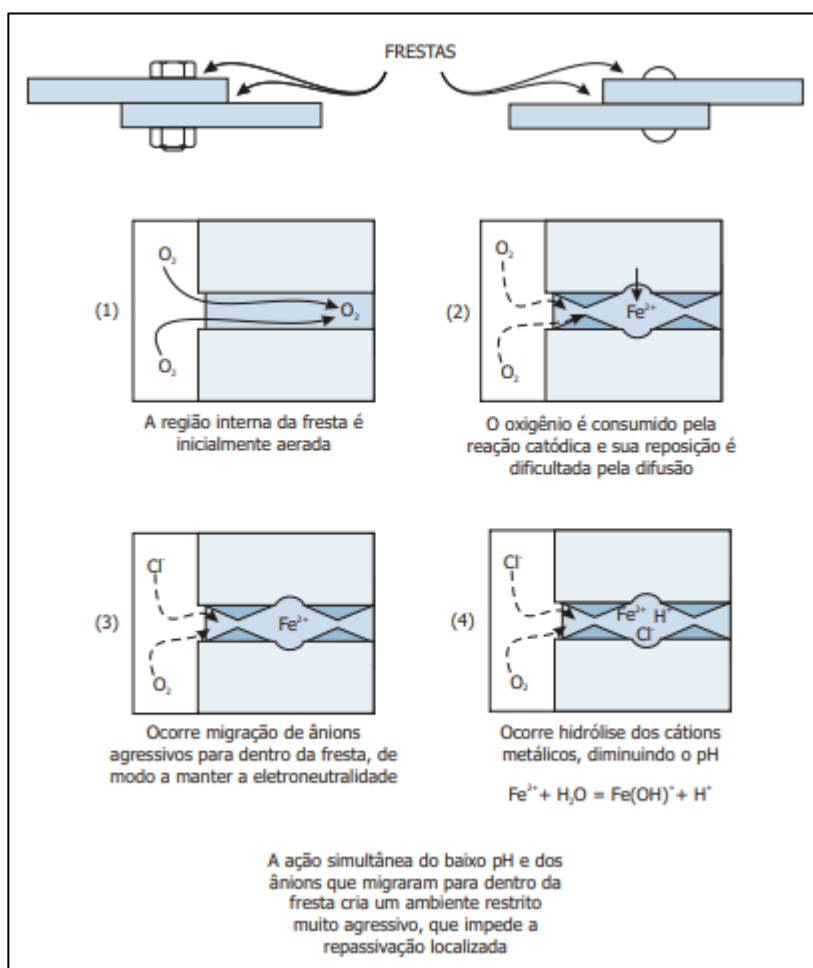
Os elétrons dessa reação eletroquímica são conduzidos através do metal para regiões externas adjacentes, onde estão consumidos por redução, provavelmente de acordo com a reação abaixo:



Em muitos ambientes aquosos, verificou-se que a solução dentro da fenda desenvolve altas concentrações de íons  $H$  e  $Cl$ , que são especialmente corrosivos. Muitas ligas que passivam são suscetíveis à corrosão das fendas porque os filmes de proteção são frequentemente destruídos por os íons  $H$  e  $Cl$ . A corrosão da fenda pode ser evitada usando uniões soldadas em vez de rebitadas ou aparafusadas,

usando juntas não absorventes quando possível, removendo depósitos acumulados frequentemente, e projetando métodos de contenção para evitar áreas estagnadas e garantir drenagem completa (CALLISTER E RETHWISCH, 2012). A figura 3 ilustra como se dá a corrosão por frestas em uma união parafusada.

Figura 3: Mecanismo de corrosão por frestas em união parafusada



Fonte: Callister, 2012.

## 2.2 COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS ATUAIS DE REVESTIMENTO DE ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

O revestimento externo com a deposição de materiais com boas propriedades com relação a corrosão é uma prática adotada que apresenta bons resultados com relação ao aumento da vida útil dos elementos de fixação a um custo relativamente baixo quando comparado a fabricar um componente inteiro com material resistente à corrosão. Neste capítulo será feito um comparativo entre as

técnicas mais atuais de deposição de revestimento aplicadas em elementos de fixação, tais como, galvanoplastia, imersão a quente, galvanização, deposição de vapor de íons e revestimento mecânico, em termos de suas características, desempenho de resistência à corrosão e custos.

Na tabela 1, pode ser visto o resumo das vantagens e desvantagens das diferentes técnicas de deposição de revestimento.

Tabela 1: Resumo das vantagens e desvantagens das diferentes técnicas de deposição de revestimento

| Deposition technique  | Advantages                                                                                                                                                                                                                                                               | Disadvantages                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Electroplating        | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Thin, smooth, dense, and adherent coating</li> <li>✓ Capable of plating high performance alloy coatings</li> <li>✓ Processing temperatures &lt;100 °C</li> </ul>                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>✗ High risk of hydrogen embrittlement</li> <li>✗ Toxic plating solutions</li> <li>✗ More chemicals required for thicker coatings compared to mechanical plating</li> </ul> |
| Hot-dip galvanizing   | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Thick coating for longer corrosion protection</li> <li>✓ Economical process</li> </ul>                                                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Risk of hydrogen embrittlement</li> <li>✗ High processing temperatures</li> </ul>                                                                                        |
| Ion vapour deposition | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Thin and adherent coatings</li> <li>✓ Uniform coating thickness</li> <li>✓ No risk of hydrogen embrittlement</li> </ul>                                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>✗ High equipment costs</li> <li>✗ Low lubricity coating</li> <li>✗ Moderate processing temperatures</li> </ul>                                                             |
| Mechanical plating    | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Thin coatings</li> <li>✓ No risk of hydrogen embrittlement</li> <li>✓ Room temperature process</li> <li>✓ Environmentally-friendly plating solution</li> <li>✓ Comparatively low chemical usage for thicker coatings</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Highly porous and less adhesion coatings</li> <li>✗ Uneven coating thickness</li> </ul>                                                                                  |

Fonte: CHUNG, WANG e DURANDET, 2005.

Segundo CHUNG et al (2005), para os processos de deposição de revestimento revisados, os parâmetros de processo afetam significativamente a formação da microestrutura, adesão, porosidade e rugosidade da superfície dos revestimentos e, portanto, influenciam a resistência à corrosão e atrito característicos dos revestimentos. Várias técnicas de deposição de revestimento são comparadas e resumidas na tabela 2. Cada método tem suas próprias vantagens e desvantagens, dependendo das propriedades desejadas e expectativas. A galvanização é vantajosa na formação revestimentos muito finos e bastante uniformes, mas o risco de fragilização por hidrogênio é inevitável, a menos que a galvanoplastia é feita com eletrólitos não aquosos. A galvanização por imersão a quente é um método que pode produzir revestimentos comparativamente mais espessos, que consistem em fases intermetálicas, para uso em ambientes severamente corrosivos ao meio ambiente. No entanto, a temperatura do processo

para esta técnica é alta e, portanto, consome muito mais energia. Semelhante à galvanoplastia, por imersão a quente a galvanização tende a induzir fragilização por hidrogênio. Em contraste, a deposição de vapor de íons e revestimento não apresentam um risco potencial. A deposição de íons de vapor (IVD) é usada principalmente para deposição fina, revestimentos de alumínio uniformes e altamente adesivos para aplicações na indústria aeroespacial. A lubrificação do IVD no alumínio é baixa, no entanto, o equipamento usado para o processo é muito mais caro. O revestimento mecânico, por outro lado, não requer investimento em equipamentos de alto custo e altas temperaturas de processo para depositar uma ampla gama de espessuras revestimentos em fixadores. No entanto, os revestimentos formados são comparativamente porosos, menos uniformes e adesivos.

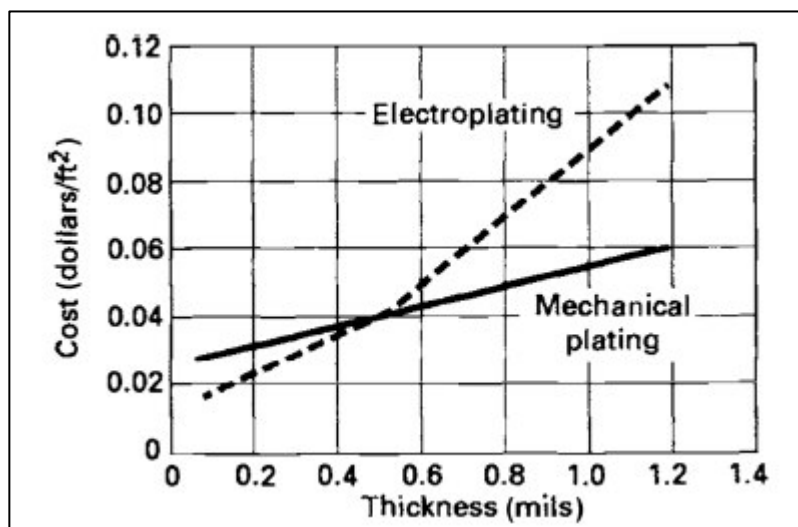
Tabela 2: Comparações de métodos de deposição de revestimento de fixadores

|                              | Electroplating                  | Hot-dip galvanizing            | Ion vapour deposition      | Mechanical plating           |
|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Types of coating             | Zn-based Al-based (non-aqueous) | Zn-based                       | Al-based                   | Zn-based                     |
| Coating thickness            | <25 $\mu\text{m}$               | 30–60 $\mu\text{m}$            | 8–25 $\mu\text{m}$         | 5–75 $\mu\text{m}$           |
| Thickness uniformity         | Fairly good                     | Moderate                       | Excellent                  | Poor                         |
| Coating porosity             | Very low                        | Low                            | Low                        | High                         |
| Process temperature          | <100 °C                         | 435–560 °C                     | 100–300 °C                 | Room temperature             |
| State of process             | Liquid                          | Liquid                         | Vapour                     | Solid                        |
| Deposition rate              | 0.1 $\mu\text{m}/\text{min}$    | 0.8–2 $\mu\text{m}/\text{min}$ | 2 $\mu\text{m}/\text{min}$ | 0.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ |
| Hydrogen embrittlement       | Possible (aqueous)              | Possible                       | No                         | No                           |
| Typical industry application | Automotive, marine              | Construction                   | Aerospace                  | Construction, automotive     |

Fonte: CHUNG, WANG e DURANDET, 2005.

Em comparação com galvanoplastia, o revestimento mecânico mostra uma possível economia de custos em termos de uso de produtos químicos, especialmente se um revestimento mais espesso for depositado, como mostrado na Figura 4. Além disso, peças com orifícios de 0,78 mm de diâmetro, que geralmente são difíceis de serem galvanizado a uma espessura desejada, pode ser revestido por revestimento mecânico (SATOW, 1994).

Figura 4: Comparação de custos de galvanização mecânica e galvanoplastia



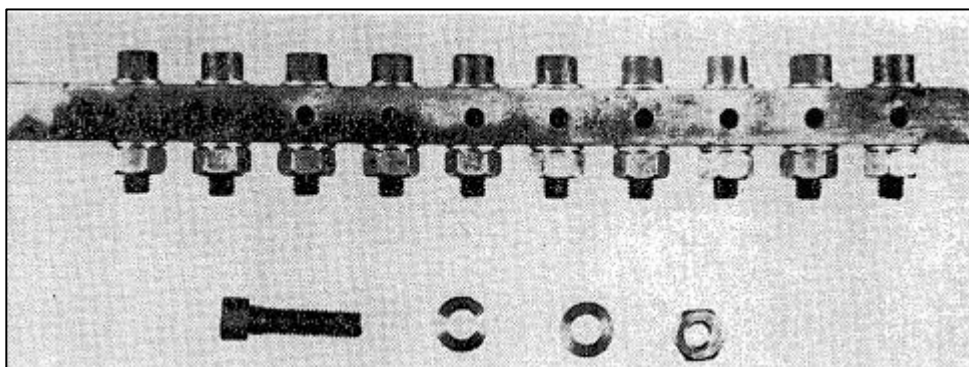
Fonte: Satow, 1994

### 2.3 TRINCAS POR CORROSÃO DE SULFETO EM PARAFUSOS DE ALTA RESISTÊNCIA

Este mecanismo é caracterizado pela fratura frágil por trincamento resultante da ação conjunta de tensões trativas e corrosão em presença de água contendo sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ). É uma forma de corrosão assistida pelo hidrogênio, resultante da absorção de hidrogênio atômico produzido pelo processo de corrosão por sulfetos na superfície do metal. O trincamento pode ter início na superfície do aço em zonas localizadas de alta dureza, no metal de solda e na zona termicamente afetada (POLOPONSKY, 2013).

No artigo *Sulfide Corrosion Cracking Of High Strength Bolting Materials* os autores analisaram o comportamento de trincas por corrosão por sulfeto em parafusos tipo 4140 em sistemas  $H_2S$ - $H_2O$  a temperaturas de 20 a 120 ° C e a pressões de 1 a 17 atmosferas. Para realização do experimento, conjuntos compostos por 02 barras foram unidas por 10 parafusos com suas respectivas porcas e par de arruelas, conforme Figura 5. Os parâmetros de pressão, temperatura, tensão aplicada e até mesmo material dos elementos de fixação foram alterados isoladamente, visando maior compreensão sobre a alteração de cada fator.

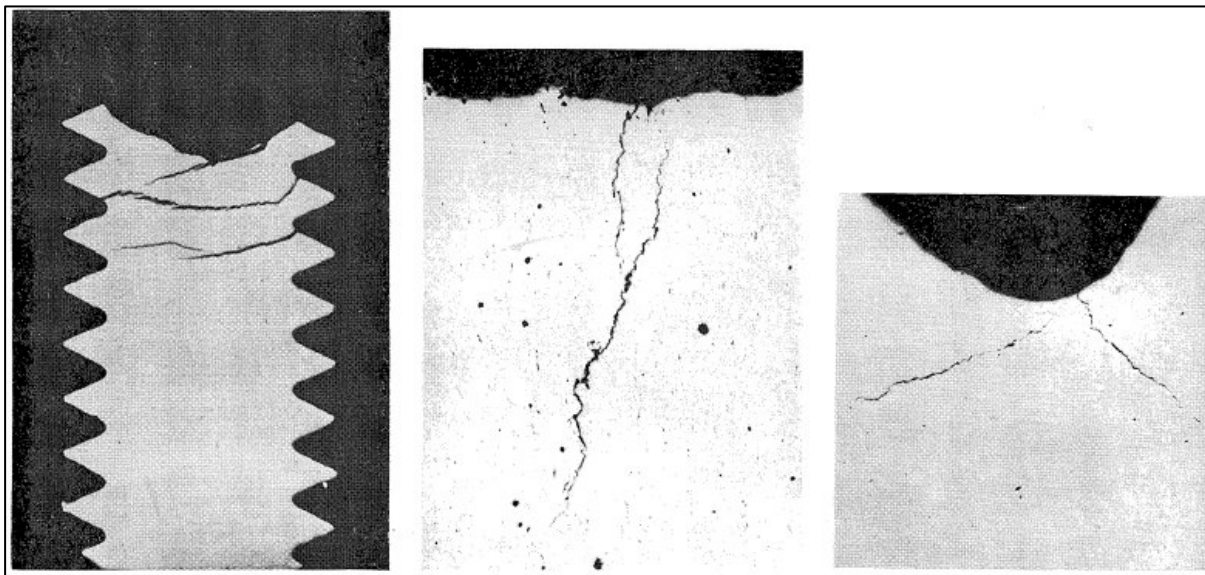
Figura 5: Barra de teste com parafusos



Fonte: WARREN e BECKMAN,1957.

Após análise dos dados conclui-se que, a suscetibilidade a trincas aumentou com o aumento da dureza do parafuso, o aumento da tensão aplicada, o aumento da quantidade de deformação plástica e a diminuição da temperatura do teste. Outros materiais de aparafusamento, como Inconel, Inconel-X, K-Monel e aço inoxidável recozido Tipo 316 eram completamente resistentes à fissuração por corrosão por sulfeto. Na Figura 6, pode-se observar trincas oriundas dos ensaios que foram realizados.

Figura 6: Imagens após a realização do ensaio



Fonte: WARREN e BECKMAN,1957.

O uso de revestimentos metálicos de proteção e a adição de inibidores de corrosão ao sistema de teste foram avaliados como um meio de impedir a fissuração por corrosão por sulfeto dos parafusos tipo 4140. Acredita-se que a fissuração por

corrosão por sulfeto dos parafusos do tipo 4140 seja melhor explicada com base na fragilização por hidrogênio.

## **2.4 CORROSÃO DE TUBOS E TANQUES DE AÇO CARBONO POR ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO**

Tendo em vista que o ambiente onde foi realizado o ensaio de corrosão tem predominância de produtos de ácido sulfúrico e que os materiais dos parafusos utilizados atualmente são aço carbono, cabe aqui realizar uma revisão de literatura sobre o mecanismo de corrosão do aço carbono no ácido sulfúrico, fatores aceleradores, tipos de corrosão do aço carbono e os métodos preventivos contra essa corrosão.

A corrosão dos tanques e tubos de armazenamento de aço carbono pelo ácido sulfúrico concentrado é uma grande preocupação. O contato do aço de carbono com ácido sulfúrico concentrado gera um ataque ácido imediato com a formação de hidrogênio gasoso e íons ferrosos, o que, por sua vez, forma uma camada protetora de  $\text{FeSO}_4$  sobre a superfície metálica. (PANOSSIAN et al, 2012).

As ligas mais usadas no manuseio de ácido sulfúrico são as de carbono aço e aços inoxidáveis austeníticos UNS S304 e UNS S316. Cada material exibe um comportamento diferente em compostos sulfúricos concentrados de ácido. A Tabela 3 mostra alguns valores da taxa de corrosão dessas ligas em ácido sulfúrico concentrado. Os dados da tabela 3 demonstram que o aço carbono tem maiores taxas de corrosão do que o aço inoxidável austenítico UNS S304 e S316 aços. No entanto, o custo do aço carbono é muito menor do que o aços inoxidáveis acima mencionados, por esse motivo, o aço carbono é preferido por muitos setores como material de construção para tanques de armazenamento de ácido sulfúrico concentrado. Porém, o sucesso dessa escolha dependerá significativamente da adoção de medidas adequadas de prevenção da corrosão (PANOSSIAN et al, 2012).

Tabela 3: Taxas de corrosão (mm y<sup>-1</sup>) do aço carbono e aços inoxidáveis em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

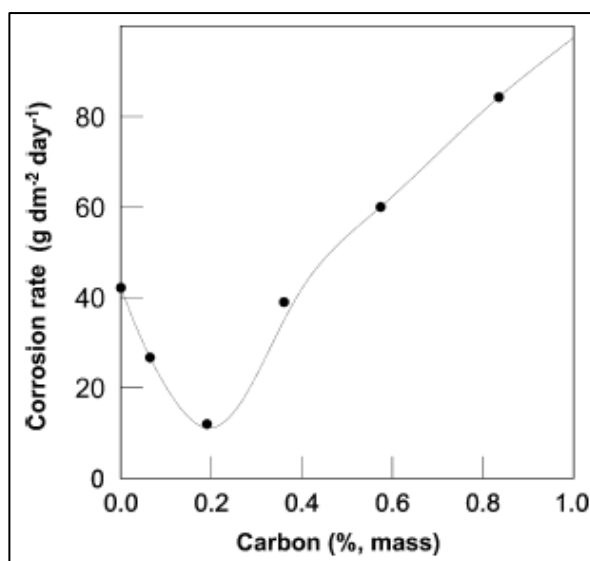
| Carbon steel<br>(33 °C and 2.0 m s <sup>-1</sup> flow) |                                       | Austenitic stainless<br>steel (30 °C and 2.1 m s <sup>-1</sup> flow) |                                         |                                       |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| 93.5% (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                | 98% (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | UNS                                                                  | 92.5% (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | 98% (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) |
| 1.91                                                   | 1.02                                  | S304                                                                 | 1.52                                    | 0.38                                  |
|                                                        |                                       | S316                                                                 | 0.76                                    | 0.38                                  |

Fonte: Panossian et al, 2012.

### 2.4.1 MECANISMOS DE CORROSÃO DO AÇO CARBONO NO ÁCIDO SULFÚRICO

Quando o aço carbono entra em contato com o ácido sulfúrico diluído, o ataque ao metal ocorre com a formação de hidrogênio íons gasosos e ferrosos. Segundo Dean e Grab (1985), a taxa de corrosão do aço carbono em ácidos diluídos depende fortemente das composições químicas do aço, especialmente o teor de carbono. Consequentemente, a reação de oxidação do ferro ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ) ocorre na fase de ferrita, e ocorre a reação de redução catódica do hidrogênio ( $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ ) na fase cementita. Essas reações explicam o papel importante do teor de carbono nas taxas de corrosão do aço e são mostrados na Figura 7. Essa figura mostra a taxa de corrosão de aços carbono em 6,5 mol L<sup>-1</sup> (correspondendo a quase 50%) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> em função do teor de carbono. O aço com 0,19% de carbono exibiu a menor taxa de corrosão.

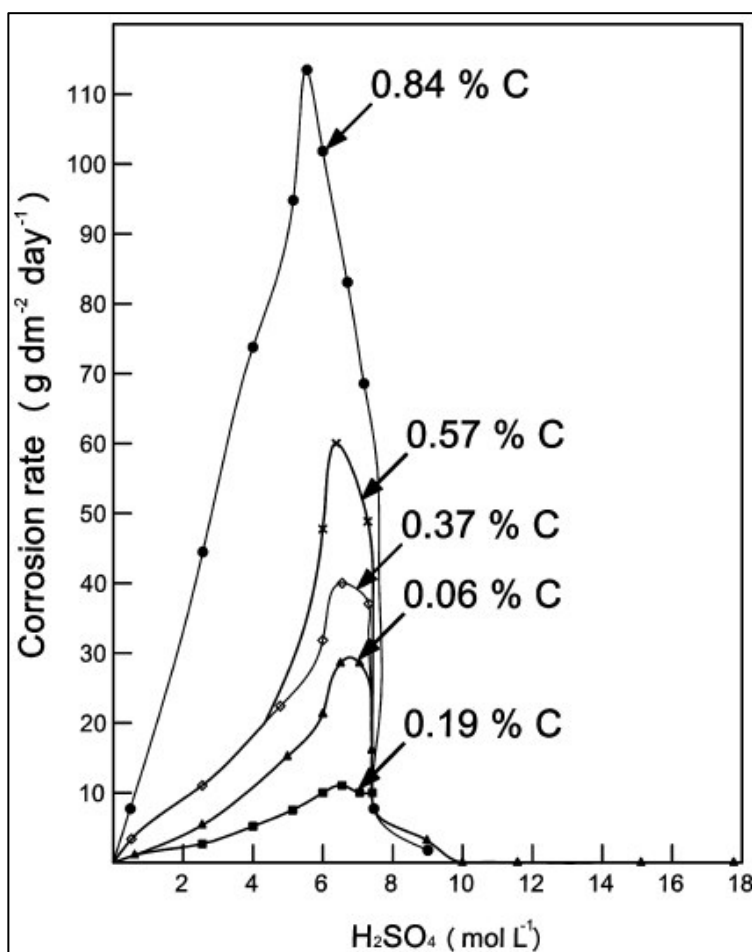
Figura 7: Taxa de corrosão do aço carbono em função do teor de carbono



Fonte: Panossian et al, 2012.

A figura 8 mostra a dependência da taxa de corrosão na concentração de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Até concentrações dentro da faixa de  $(5-6) \text{ mol L}^{-1}$ , correspondente a 40–46,5%, a taxa de corrosão dos aços carbono tende a aumentar com diferentes intensidades, dependendo no seu teor de carbono. Já, em concentrações maiores que  $(5-6) \text{ mol L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$ , a taxa de corrosão diminui da mesma maneira para todos os aços e acima de uma concentração de aproximadamente  $9 \text{ mol L}^{-1}$  (que corresponde a 63%)  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , a taxa de corrosão se torna baixa e assume quase o mesmo valor para todos os aços testados. Esses resultados sugerem que, em altas concentrações de ácido, a taxa de corrosão não depende mais do teor de carbono, o que significa que outro mecanismo de corrosão está ocorrendo. Quando o aço carbono entra em contato com o ácido sulfúrico concentrado, o primeiro é de fato reduzido para formar  $\text{H}_2$  e o ferro oxida com a formação de sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ) (PANOSSIAN et al, 2012).

Figura 8: Taxa de corrosão em função da concentração de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para aço carbono com quantidades diferentes de carbono



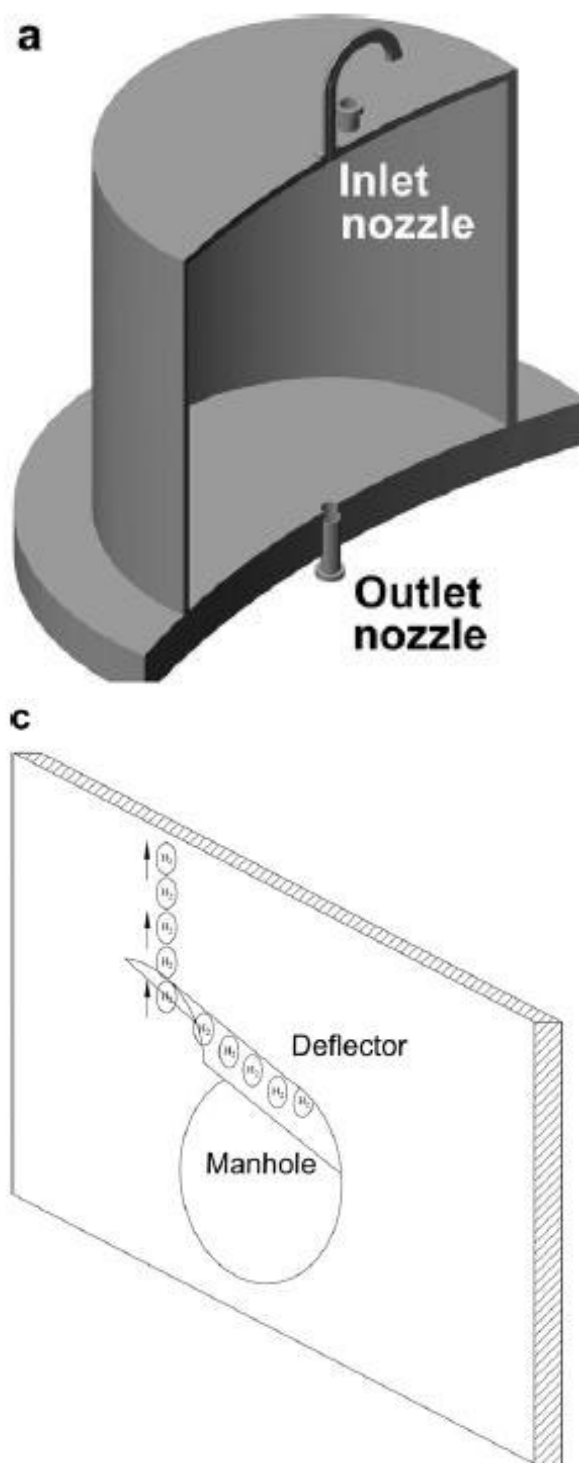
Fonte: Panossian et al, 2012.

O  $\text{FeSO}_4$  adere à superfície do aço e forma uma camada protetora. Esta camada evita que o metal sofra ataques adicionais por ácido sulfúrico concentrado. Portanto, a durabilidade dos tanques feitos de o aço carbono depende da preservação da camada de  $\text{FeSO}_4$ . Segundo Dean e Grab (1985), a transferência de massa de  $\text{FeSO}_4$  é a etapa de controle no mecanismo de corrosão para concentração de ácido entre 50% e 99% para o aço à temperatura ambiente. Em concentrações inferiores a 50%, as taxas de corrosão são mais baixas e são influenciados pelo teor de carbono do aço carbono, como já mostrado nas figuras 7 e 8. Neste último caso, a redução do ferro a hidrogênio no processo é o fator limitador da taxa e não a dissolução de  $\text{FeSO}_4$ .

Diante do exposto até aqui, percebe-se que a resistência à corrosão do aço carbono no ácido sulfúrico é uma consequência da formação de uma camada protetora de  $\text{FeSO}_4$  e não depende da composição do aço. Assim, medidas preventivas devem ser selecionadas com base na preservação dessa camada protetora. Portanto, todos os fatores que causam danos à proteção protetora de  $\text{FeSO}_4$  causará um aumento na taxa de corrosão do aço carbono em ácido sulfúrico concentrado. A camada de  $\text{FeSO}_4$  é macia e pouco aderente, o que significa que pode ser facilmente danificado. Entre os fatores que causar tais danos, os mais importantes são a diluição ácida, um aumento na temperatura e um aumento no movimento relativo entre o metal e o ácido. Assim, para garantir boas desempenho de tanques e tubulações de aço carbono, é necessário evitar a entrada de umidade, exposição direta ao aquecimento radiante do sol na superfície do metal, alta velocidade de fluxo de ácido sulfúrico e turbulência ácida e alta. Na Figura 9 pode ser visto um mecanismo que auxilia com relação aos fatores indicados anteriormente. Além disso, o uso de proteção anódica é muito eficiente na redução da taxa de corrosão do aço carbono no ácido sulfúrico concentrado porque uma polarização anódica causa uma modificação da camada de  $\text{FeSO}_4$ . (PANOSSIAN et al, 2012).

A Figura 9 traz a ilustração esquemática que mostra a prevenção de canais de hidrogênio: a) tanque vertical com o bico de entrada superior colocado próximo ao centro do teto do tanque; b) com o bico de entrada superior com defletores; c) bueiro com defletores.

Figura 9: Ilustração esquemática da prevenção de canais de hidrogênio



Fonte: Panossian et al, 2012.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção do trabalho serão apresentadas os materiais e métodos que fundamentaram o estudo desenvolvido.

#### 3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

Na indústria de fertilizantes, os ambientes fabris, em sua maioria, possuem grande presença de umidade e produtos químicos oriundos do processo de fabricação. A fábrica que é objeto deste estudo fica localizada as margens do canal de acesso do Porto de Rio Grande, situado na cidade de Rio Grande – RS, Brasil, conforme ilustrado na figura 10 a seguir.

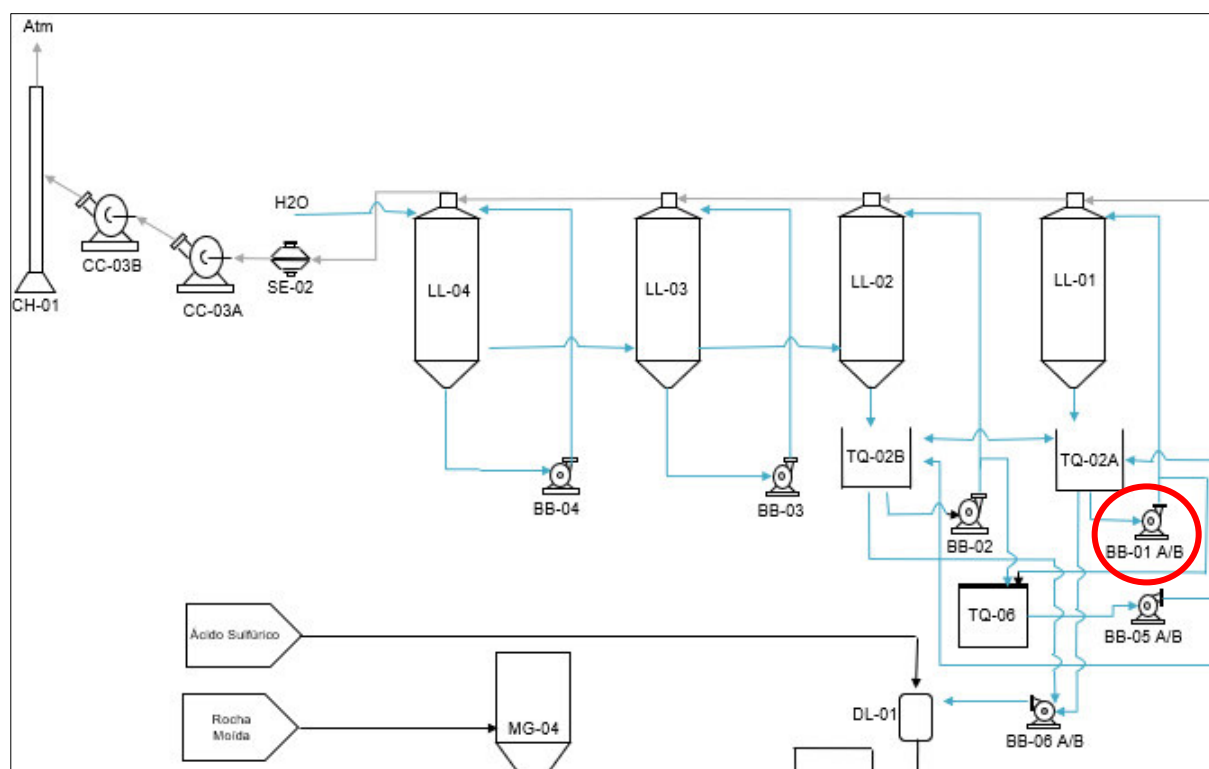
Figura 10: Localização da fábrica em estudo



Fonte: Google Maps.

Para realização deste estudo foi escolhido a área da planta industrial que apresenta o ambiente mais severo quanto à corrosão, de acordo com o histórico de intervenções em manutenção de linhas de tubulação industrial devido à problemas com corrosão. A partir da escolha da área mais crítica, espera-se obter a especificação de elementos de fixação que atendam o restante da fábrica. O local escolhido para a realização do experimento é o sistema de lavagem de gases da unidade de acidulação de rocha. Os elementos de fixação analisados serão os utilizados na descarga da bomba centrífuga de tag RIG1-0110-BB01A/B (conforme figura 11) que possui como fluido de trabalho uma mistura de água e ácido sulfúrico. Cabe ressaltar que somente uma das bombas é utilizada durante o processo, sendo uma reserva da outra. A equipe de operação alterna entre a bomba A e B a cada 48h, para prolongar a vida útil de ambas em operação. Mais especificamente, foi escolhido o par de flanges da tubulação de descarga desta bomba que possui 16 conjuntos de fixação, cada um composto por um parafuso, uma porca e duas arruelas. O material da tubulação da linha é PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro).

Figura 11: Fluxograma da planta de acidulação



Fonte: Documentos da empresa em estudo.

### 3.2 ANÁLISE DA CORROSÃO DOS ELEMENTOS DE FIXAÇÃO UTILIZADOS NA FÁBRICA

Diante do exposto, inicialmente foi realizado um experimento com os conjuntos de fixação que já são utilizados atualmente na descarga da bomba. Para realizar a análise da corrosão destes elementos de fixação, foram instalados 16 conjuntos de fixação, cada um composto por um parafuso, uma porca e duas arruelas. Após 30 dias instalados com a fábrica em operação, o conjunto foi retirado e realizado limpeza e preparação para análise de corrosão, conforme prevê a norma ASTM G31. Tais ensaios foram realizados sob condições de serviço, permitindo, portanto, uma avaliação fidedigna da ação do meio corrosivo sobre o material metálico.

As especificações dos elementos de fixação que eram utilizados na descarga da bomba podem ser vistos na tabela 4.

Tabela 4: Especificação dos elementos de fixação

| Componente | Especificação                                                                                         | Material                  |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Parafuso   | Cabeça sextavada com rosca parcial; diâmetro: 3/4 "; passo: 10 FPP; comprimento: 4"; sem revestimento | Aço carbono ASTM A307 B   |
| Porca      | Porca sextavada diâmetro: 3/4"; Passo: 10 FPP"; sem revestimento                                      | Aço Carbono ASTM A307 A   |
| Arruela    | Arruela lisa formato circular; diâmetro: 3/4 "; espessura: 2,84 mm; sem revestimento                  | Aço carbono SAE 1010/1020 |

Fonte: O autor.

### 3.3 ANÁLISE DO AMBIENTE DE TESTE

Paralelamente, o ambiente em que os elementos estão instalados foi analisado. Em função dessa região da fábrica apresentar muitos vazamentos e gases oriundos do sistema de lavagem da chaminé, será considerado que o maior agressor aos elementos de fixação é produto dos líquidos presentes na bacia de contenção onde estão instaladas as bombas. Assim, uma amostra desses líquidos foi coletada pelos operadores da fábrica e, posteriormente, realizado a análise no laboratório de análises química da empresa de fertilizantes em estudo. Com base

nesta análise, foi verificado os componentes presentes que podem agredir mais severamente os materiais dos elementos de fixação.

### **3.4 ESCOLHA DE MATERIAIS ALTERNATIVOS**

Após a conclusão da primeira etapa da pesquisa, com a análise dos elementos de fixação que são atualmente utilizados na fábrica, foi realizado um estudo para identificar possíveis materiais alternativos para substituição, com melhores características em relação a corrosão do que os utilizados até então. Após, foi selecionado comercialmente dois tipos de conjunto de fixação para ser testado no mesmo ambiente, ampliando o período do experimento anterior.

### **3.5 ANÁLISE DA CORROSÃO DO ELEMENTO DE FIXAÇÃO PROPOSTO**

Por fim, os elementos de fixação instalados foram retirados após os 30 dias de teste e preparados para análise de corrosão, pesagem e inspeção visual dos conjuntos. Devido a agressividade do meio em que estão inseridos os elementos de fixação, entende-se que a inspeção visual dos componentes e perda mássica são fatores suficientes para validar a melhora nas propriedades de corrosão dos elementos de fixação. Na figura 12 pode-se observar que ocorre alteração significativa na geometria dos elementos, não cabendo uma análise microscópica para visualização.

Figura 12: Alterações geométricas dos elementos de fixação



Fonte: O autor.

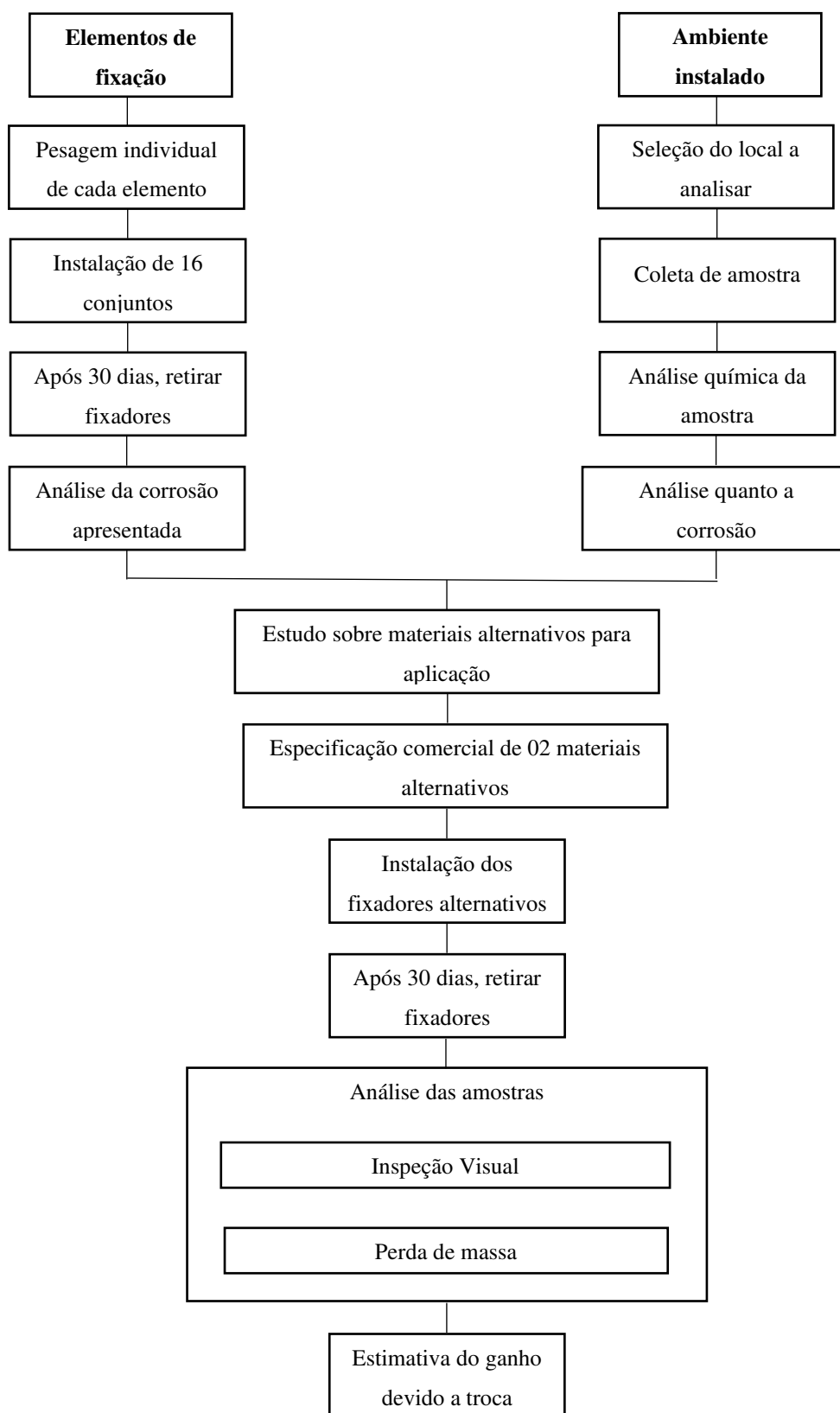
### **3.6 ESTIMATIVAS DE GANHO**

Por fim, foi estimado o ganho financeiro esperado para empresa com o aumento de produtividade nas trocas dos elementos de fixação, redução de paradas de fábrica e número de trocas necessárias. Para isso, será medido em campo o tempo de troca de 16 conjuntos de fixação nas condições antigas e comparado ao tempo de troca utilizando o novo material. Será também, verificado no software de gerenciamento de manutenção utilizado pela empresa, o SAP (Sistemas, Aplicativos e Produtos para processamento de dados), o histórico de intervenções para troca de parafusos nas unidades de acidulação, bem como as perdas produtivas vinculadas a elas e feito uma estimativa de ganho global. A base de dados utilizadas será referente ao ano de 2020.

### **3.7 ESTRUTURA ANALÍTICA EXPERIMENTAL**

Visando um melhor entendimento e uma visualização global do procedimento experimental, foi desenvolvida a figura 13, que apresenta a estrutura analítica experimental do presente estudo.

Figura 13: Estrutura analítica experimental.



Fonte: o autor

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da pesquisa, bem como a discussão desses resultados.

### 4.1 ANÁLISE DOS ELEMENTOS DE FIXAÇÃO UTILIZADOS

Foi retirado em almoxarifado 16 conjuntos de fixação em condições originais de fabricação (figura 14) e realizado a pesagem deles. Na tabela 5 pode-se observar os valores obtidos nesta pesagem e a especificação destes elementos. A pesagem de cada conjunto foi realizada com uma balança semianalítica modelo BK5000, do fabricante GEHAKA.

Tabela 5: Pesagem dos elementos de fixação originais

| <b>Componente</b> | <b>Especificação</b>                                                                                  | <b>Material</b>           | <b>Massa [g]</b> |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------|
| Parafuso          | Cabeça sextavada com rosca parcial; diâmetro: 3/4 "; passo: 10 FPP; comprimento: 4"; sem revestimento | Aço carbono ASTM A307 B   | 260,6            |
| Porca             | Porca sextavada diâmetro: 3/4"; Passo: 10 FPP" ; sem revestimento                                     | Aço Carbono ASTM A307 A   | 50               |
| Arruela           | Arruela lisa formato circular; diâmetro: 3/4 "; espessura: 2,84 mm ; sem revestimento                 | Aço carbono SAE 1010/1020 | 18               |
| Total             |                                                                                                       |                           | 346,6            |

Fonte: O autor

Figura 14: Conjunto de fixação original



Fonte: O autor

Após a retirada em almoxarifado, foi realizado a instalação dos elementos de fixação na descarga das bombas 110BB01A e B., conforme figura 15.

Figura 15: Local de instalação dos componentes



Fonte: O autor

Durante o período de testes foram realizadas inspeções visuais em campo a cada 3 dias para observar o comportamento dos elementos de fixação e verificar se poderia existir algum fator que comprometesse a qualidade da análise dos dados do teste. Decorridos os 30 dias dos elementos de fixação instalados e com a unidade de acidulação operando, eles foram removidos durante a parada mensal de manutenção. Após removidos, foi realizado a pesagem dos conjuntos e realizado a inspeção visual dos mesmos. Para tal, as amostras foram limpas em água destilada, imersas em acetona, secas e pesadas individualmente. Na tabela 6 pode-se observar os resultados obtidos.

Tabela 6: Perda de massa por corrosão

| <b>Conjunto de fixação</b> | <b>Massa [g]</b> | <b>Perda massa[g]</b> | <b>Perda de massa [%]</b> |
|----------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1                          | 123,6            | 223,0                 | 64,3%                     |
| 2                          | 116,8            | 229,8                 | 66,3%                     |
| 3                          | 122,9            | 223,7                 | 64,5%                     |
| 4                          | 320,4            | 26,2                  | 7,6%                      |
| 5                          | 263,8            | 82,8                  | 23,9%                     |
| 6                          | 307,6            | 39,0                  | 11,3%                     |
| 7                          | 303,8            | 42,8                  | 12,3%                     |
| 8                          | 158,6            | 188,0                 | 54,2%                     |
| 9                          | 192,6            | 154,0                 | 44,4%                     |
| 10                         | 158,2            | 188,4                 | 54,4%                     |
| 11                         | 158,9            | 187,7                 | 54,2%                     |
| 12                         | 192,7            | 153,9                 | 44,4%                     |
| 13                         | 191,0            | 155,6                 | 44,9%                     |
| 14                         | 149,8            | 196,8                 | 56,8%                     |
| 15                         | 145,7            | 200,9                 | 58,0%                     |
| 16                         | 193,7            | 152,9                 | 44,1%                     |

Fonte: O autor

Pode-se observar que em todos os conjuntos foi constatado perda de massa significativa, vindo a ocorrer comprometimento da união flangeada, acarretando vazamentos e perdas para a unidade. Na figura 16 pode-se evidenciar que ocorreu também alterações significativas nas formas geométricas dos parafusos, porcas e arruelas.

Figura 16: Alterações geométricas dos elementos de fixação geral



Fonte: O autor

A corrosão atmosférica com a formação de uma fina película de eletrólito sobre a superfície do metal permitindo o ataque do tipo eletroquímico mostrou-se predominante no ambiente de teste. Outros componentes presentes na atmosfera do ambiente ao qual o metal está exposto também afetaram a corrosividade do meio, tais como, gases, vapores, poluentes, vazamentos, entre outros, confirmando a o aspecto teórico trazido por WOLYNEC et al. (1992).

Figura 17: Alterações geométricas dos elementos de fixação destaque



Fonte: O autor.

Em virtude da agressividade do meio ao material dos elementos de fixação ocorreu perda de massa significativa em todos os conjuntos. Segundo Gentil (2007), a perda de massa é um fator relevante quando a corrosão é uniforme. O conjunto que houve maior perda passou de 346,6g para 116,8g, caracterizando uma redução de 66,3% da massa total do conjunto, como pode ser visto na tabela 6.

Diante dos dados apresentados, verificou-se que o período de 30 dias foi adequado para a realização do experimento em campo e que os resultados obtidos foram representativos em função da análise que se buscava. Sendo assim, constata-se que os elementos de fixação utilizados como padrão pela empresa de fertilizantes objeto de estudo não apresentam boas características com relação à corrosão no meio em que estão inseridos, justificando-se assim o estudo aprofundando buscando desenvolver materiais alternativos para aplicação.

## 4.2 ANÁLISE DO AMBIENTE INSTALADO

O maior agressor encontrado no ambiente das bombas do sistema de lavagem trata-se dos líquidos ou vapores existentes frutos da lavagem dos gases antes de sua exaustão pela chaminé da unidade. Diante disso, foi coletada uma amostra da água que fica depositada nesta bacia e enviada para o laboratório de análises da própria empresa de fertilizantes objeto de estudo, que terceirizou a análise mais profunda dos efluentes coletados. Os principais resultados obtidos podem ser observados na tabela 7. Os demais dados da análise do material coletado podem ser observados no anexo 1.

Tabela 7: Análise Físico-Química da amostra

| <b>Físico-Química</b>     |                  |                |             |                       |
|---------------------------|------------------|----------------|-------------|-----------------------|
| <b>Ensaio</b>             | <b>Resultado</b> | <b>Unidade</b> | <b>L.Q.</b> | <b>Metodologia</b>    |
| Enxofre                   | 697,0            | mg/L           | 3,0         | SMWW 23ª 4500-SO4-2 E |
| Acidez total              | 396000,0         | mg/L           | 30          | SMWW 23ª 2310 B       |
| <b>Alcalinidade total</b> | < 10,0           | mg/L           | 10,0        | SMWW 23ª 2320 B       |
| Densidade                 | 1,30             | g/cm³          | 0,01        | Gravimetria           |
| <b>Dureza total</b>       | 1878,9           | mg/L           | 3,0         | SMWW 23ª 2340 C       |
| Salinidade                | 40,2             | %              | 0,3         | SMWW 23ª 2520 B       |
| Sílica solúvel (reativa)  | < 1,2            | mg/L           | 1,2         | SMWW 23ª 4500 SiO2 C  |

Fonte: Relatório de Ensaio Nº 18876/20 – Empresa Ecocerta

As bombas do sistema de lavagem recirculam constantemente água ácida em no mínimo uma solução entre 15 e 20% de  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  (Ácido Fluossilícico) com até 1,2% de HF (Ácido Fluorídrico) e garantidamente aproximadamente 15% de  $\text{SiO}_2$  (Sílica ou amorfa ou cristalina). Os gases que vem do sistema de acidulação podem arrastar consigo rocha fosfática (mineral complexo com no mínimo  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Ácido Sulfúrico).

Diante dos resultados da análise físico-química da amostra coletada, pode-se verificar elementos como ácido sulfúrico, sílica e alta acidez que atacam fortemente o aço carbono. Sendo assim, introduzir um inibidor de corrosão neste processo torna-se imprescindível para o bom desempenho dos elementos de fixação no ambiente instalado.

### **4.3 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA APLICAÇÃO**

A definição dos materiais alternativos para aplicação levou em conta os seguintes fatores:

- 1- Fator custo;
- 2- Disponibilidade de compra em larga escala no mercado nacional;
- 3- Aplicabilidade na indústria de fertilizantes;
- 4- Resistência à corrosão

Diante disso, destaca-se nos itens a seguir os possíveis elementos de fixação para serem aplicados durante os testes de campo.

#### **4.3.1 AÇO INOX 316**

A primeira opção quando falamos em materiais resistentes à corrosão na indústria de fertilizantes são os aços inoxidáveis. No entanto, historicamente esta aplicação não teve sucesso devido à grande dificuldade de desmontagem dos elementos de fixação das uniões flangeadas quando eles apresentam um grau mínimo de corrosão. Como não há possibilidade de cortar os parafusos com corte oxiacetileno e em locais de difícil acesso não consegue-se aplicar o corte com esmerilhadeira, sua aplicação ficou inviabilizada em função da grande dificuldade de remoção no caso de necessidade de troca de juntas, abertura das linhas para limpeza ou manutenção. Desta forma, descarta-se o aço inoxidável 316 como um possível material alternativo.

#### **4.3.2 AÇO CARBONO REVESTIDO COM XYLAN 1070 (VERMELHO)**

Os elementos de fixação revestidos com Xylan 1070 contém inibidores de corrosão para melhor resistência à corrosão. Ele se destaca em aplicações exigindo um lubrificante de película seca eficaz contra um amplo espectro de produtos químicos e corrosivos. Na figura 18 pode-se observar estes elementos de fixação.

Figura 18: Elementos de fixação com xylan 1070



Fonte: O autor

Na figura 19 está a especificação dos elementos de fixação:

Figura 19: Especificações dos elementos de fixação xylan 1070

|                                     |                              |
|-------------------------------------|------------------------------|
| <b>REVESTIMENTO:</b>                | Xylan 1070/E6807E            |
| <b>COR:</b>                         | Vermelha                     |
| <b>ESPESSURA DO REVESTIMENTO:</b>   | 30 ± 10 µm                   |
| <b>FORNO N°:</b>                    | 2                            |
| <b>JATEAMENTO:</b>                  | Microesfera de vidro tipo RF |
| <b>TEMPERATURA E TEMPO DE CURA:</b> | 270 ± 10 °C - 10 mins        |

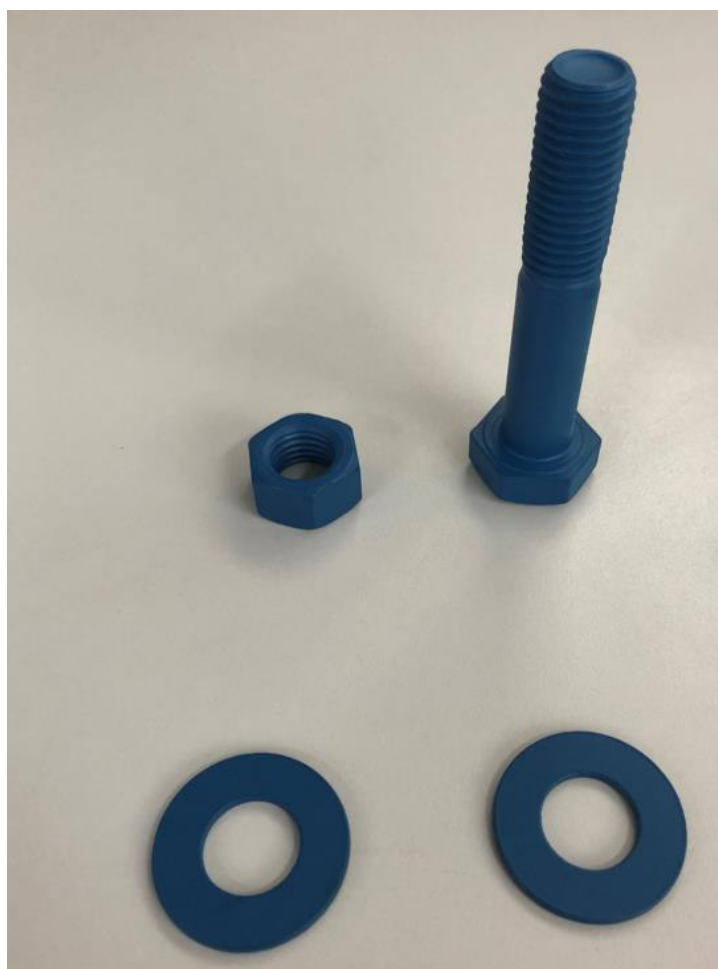
| Descrição                           | QTD |
|-------------------------------------|-----|
| P.SEXT. ROSCA PARCIAL 3/4-10UNC X 4 | 100 |
| POR. SEXT. 3/4-10UNC                | 100 |
| ARRUELA LISA 994 3/4                | 100 |

Fonte: Certificado de fornecimento dos elementos de fixação

#### 4.3.3 AÇO CARBONO REVESTIDO COM XYLAN 1010 (AZUL)

Os elementos de fixação revestidos com Xylan 1010 apresentam boas características quanto a corrosão e alta temperatura. Ele é um dos revestimentos de fluoropolímero industrial mais versáteis e confiáveis do mundo. Além disso, este lubrificante PTFE possui baixo coeficiente de atrito e pode ser utilizado em qualquer superfície de desgaste. Na figura 20 pode-se observar estes elementos de fixação.

Figura 20: Elementos de fixação com xylan 1010



Fonte: O autor

#### 4.4 CADASTRAMENTO E PARAMETRIZAÇÃO

Para que fosse possível realizar a compra dos componentes especificados no item anterior, fez-se necessário a realização do cadastramento dos itens no software que faz o gerenciamento da manutenção na empresa objeto de estudo

deste trabalho, o SAP. Nas figuras 21, 22 e 23 pode-se verificar as informações contidas no cadastro dos itens. Esta atividade foi realizada pelo time de Engenharia de Manutenção da empresa.

Figura 21: Dados cadastro elementos de teste - parafuso

**Display Material 5000154549 (Spare Parts)**

← Main Data

Document Data Basic Data Text Inspection text Internal comment

Material 5000154549 PARAFUSO SEXT A307B Xylan RT UNC 3/4X4" ⓘ

Basic data text

Langs maintained

- English
- Portuguese

Language English

PARAFUSO\_C/\_CABECA  
 TIPO\_CABECA\_PARAFUSO\_C\_\_CAB: SEXTAVADA  
 SERIE\_CABECA\_PARAFUSO\_C\_\_CAB: NAO APLICAVEL  
 DIAMETRO\_NOM\_PARAFUSO\_C\_\_CAB: 3/4IN  
 COMPRIMENTO\_PARAFUSO\_C\_\_CAB: 4IN  
 ROSCA\_PARAFUSO\_C\_\_CAB: UNC  
 CLASSE\_TOLER\_ROS\_PARAF\_C\_\_CAB: NAO APLICAVEL  
 DIRECAO\_ROSCA\_PARAFUSO\_C\_\_CAB: DIREITA  
 COMPRIMENTO\_ROSCA\_PARAF\_C\_\_CAB: TOTAL  
 PASSO\_PARAFUSO\_C\_\_CAB: 10FPP  
 MATERIAL\_PARAF\_PARAF\_C\_\_CAB: ACO CARBONO ASTM A307B GR.2  
 ACABAMENTO\_PARAF\_PARAF\_C\_\_CAB: REVESTIMENTO Xylan  
 NORMA\_DIMEN\_PARAF\_PARAF\_C\_\_CAB: ANSI B 18.2.1  
 PORCA\_PARAFUSO\_C\_\_CAB: SEXTAVADA

Li 1, Co 1 Ln 1 - Ln 14 of 24 lines

Fonte: O autor

Figura 22: Dados cadastro elementos de teste - porca

**Display Material 5000154397 (Spare Parts)**

← Main Data

Document Data Basic Data Text Inspection text Internal comment

Material 5000154397 PORCA SEXT SAE1020/XILAN 10F 3/4" UNC

Basic data text

Langs maintained

- English
- Portuguese

Language English

PORCA\_SEXTAVADA  
 DIAMETRO\_PORCA\_SEXTAVADA: 3/4IN  
 ROSCA\_PORCA\_SEXTAVADA: UNC  
 PASSO\_PORCA\_SEXTAVADA: 10 FIOS  
 CONSTRUCAO\_PORCA\_SEXTAVADA: NAO APLICAVEL  
 MATERIAL\_PORCA\_SEXTAVADA: ACO CARBONO SAE1020  
 ACABAMENTO\_SUP\_PORCA\_SEXTAVADA: REVESTIMENTO XILAN  
 CLASSE\_TOLER\_ROS\_PORCA\_SEX: NAO APLICAVEL  
 NORMA\_DIMEN\_PORCA\_SEXTAVADA: ANSI B18.2.2  
 REF\_FAB\_OB\_PORCA\_SEXTAVADA:  
 REF\_FAB\_SUG\_PORCA\_SEXTAVADA:

Li 11, Co 29 Ln 1 - Ln 11 of 11 lines

Fonte: O autor

Figura 23: Dados cadastro elementos de teste - arruela

**Display Material 5000154396 (Spare Parts)**

← Main Data

Document Data Basic Data Text Inspection text Internal comment

Material 5000154396 ARRUELA LISA CIRC SAE1020/XILAN 3/4"

Basic data text

Langs maintained

- English
- Portuguese

Language English

ARRUELA  
 ARRUELA\_1: LISA  
 ARRUELA\_2: CIRCULAR  
 ARRUELA\_3: NAO APLICAVEL  
 ARRUELA\_4: 3/4IN  
 ARRUELA\_5: 20,30MM  
 ARRUELA\_6: 40MM  
 ARRUELA\_7: 3MM  
 ARRUELA\_8: ACO CARBONO SAE1020  
 ARRUELA\_9: REVESTIMENTO XILAN  
 ARRUELA\_10: NAO APLICAVEL  
 ARRUELA\_11: NAO APLICAVEL  
 ARRUELA\_12: NAO APLICAVEL

Li 1, Co 1 Ln 1 - Ln 13 of 13 lines

Fonte: O autor

Devido a existência de contrato com alguns fornecedores alguns itens não tiveram a necessidade de passar pela etapa de cadastramento, podendo assim serem adquiridos como item genérico mediante orçamento do fornecedor.

Após a etapa de cadastramento, foi gerado requisição de compra para cotação em mercado e aquisição dos itens para teste. Na figura 24, pode-se observar os dados principais das requisições de compra geradas.

Figura 24: Requisições de compra

**Exibir Requisição compra 10449594**

Ativar síntese de documentos | Configurações pessoais

Req.Compra Indiretos: 10449594

Cabeçalho

| Stat | Item Pedido   | C | Material   | Texto breve                       | Quantidade | Unidade | Preço aval. | Valor total | Ctg.item | Dt.remissa | OrgC | GrpMercads.    | GCm | Depósito    | Centro     |
|------|---------------|---|------------|-----------------------------------|------------|---------|-------------|-------------|----------|------------|------|----------------|-----|-------------|------------|
|      | 10 4500558785 | F | 5000154549 | PARAFUSO SEXT A307B XYLAN RT UN   | 50         | PC      | 38,96       | 1.948,00    |          | 03.12.2020 | YBR1 | MM Fix./Fasten | 029 | Spare parts | Unidade de |
|      | 20 4500558785 | F | 5000154397 | PORCA SEXT SAE1020/XYLAN 10F 3/4" | 50         | PC      | 28,33       | 1.416,50    |          | 03.12.2020 | YBR1 | MM Fix./Fasten | 029 | Spare parts | Unidade de |
|      | 30 4500558785 | F | 5000154396 | ARRUELA LISA CIRC SAE1020/XYLAN   | 50         | PC      | 6,74        | 337,00      |          | 03.12.2020 | YBR1 | MM Fix./Fasten | 029 | Spare parts | Unidade de |

**Exibir Requisição compra 10465076**

Ativar síntese de documentos | Configurações pessoais

Req.Compra Indiretos: 10465076

Cabeçalho

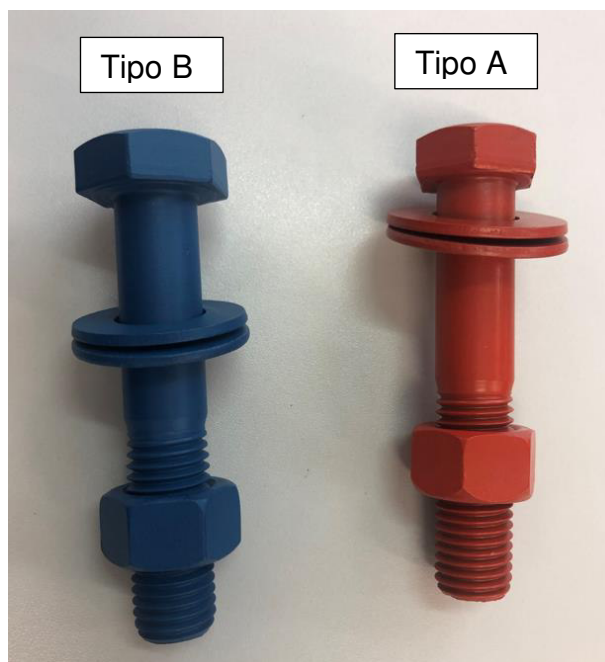
| Stat | Item Pedido   | C | Material   | Texto breve               | Quantidade | Unidade | Preço aval. | Valor total | Ctg.item | Dt.remissa | OrgC | GrpMercads. | GCm | Depósito     | Centro |
|------|---------------|---|------------|---------------------------|------------|---------|-------------|-------------|----------|------------|------|-------------|-----|--------------|--------|
|      | 10 4500573837 | F | 6000000615 | 73181500 OUTROS PARAF./PI | 100        | PC      | 18,70       | 1.870,00    |          | 01.12.2020 | YBR1 | MATERIAL GE | 081 | Commercial p |        |
|      | 20 4500573837 | F | 6000000615 | 73181500 OUTROS PARAF./PI | 100        | PC      | 6,80        | 680,00      |          | 01.12.2020 | YBR1 | MATERIAL GE | 081 | Commercial p |        |
|      | 30 4500573837 | F | 6000000615 | 73181500 OUTROS PARAF./PI | 100        | PC      | 3,20        | 320,00      |          | 01.12.2020 | YBR1 | MATERIAL GE | 081 | Commercial p |        |

Fonte: O autor

## 4.5 INSTALAÇÃO DOS ELEMENTOS DE FIXAÇÃO PROPOSTOS

Após o recebimento dos itens em almoxarifado, ocorreu o planejamento e programação da atividade de instalação dos elementos de fixação. Os elementos de fixação podem ser vistos na figura 25.

Figura 25: Elementos de fixação dos testes



Fonte: O autor

Foram instalados exatamente nas mesmas posições citadas no item 4.1 os elementos de fixação de maneira alternada – tipo A e tipo B. Com isso, a qualidade dos dados obtidos aumenta haja visto que os componentes estarão submetidos à exatamente as mesmas condições ambientais. A forma como a montagem foi realizada pode ser observada nas figuras 26, 27 e 28.

Figura 26: Montagem dos elementos de teste em campo - Visão geral



Fonte: O autor

Figura 27: Montagem dos elementos de teste em campo - Flange



Fonte: O autor

Figura 28: Montagem dos elementos de teste em campo - Montagem



Fonte: O autor

A proposta inicial para teste destes elementos de fixação foi de 30 dias, período igual ao utilizado no teste inicial com os elementos originais. Da mesma forma que no experimento inicial, a cada 3 dias foi realizado inspeção visual em campo para verificar se alguma anomalia poderia ser identificada que prejudicasse o resultado dos testes.

Ao final dos 30 dias, os fixadores foram removidos e realizados inspeção visual e preparação dos corpos de prova para o teste de perda de massa.

#### **4.5.1 PERDA DE MASSA**

O teste de perda de massa, em que se objetiva a remoção dos produtos de corrosão e a medição de perda de massa, foi realizado segundo a norma ASTM G1 2010 (*Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*) no laboratório da empresa objeto de estudo. Esta análise permite o cálculo das taxas de corrosão e a obtenção de informações sobre a resistência a

corrosão apresentada pelo corpo de prova durante o ensaio realizado. Para tal, as amostras foram limpas em água destilada, imersas em acetona, secas e pesadas individualmente em balança analítica com precisão de 0,01 g. Na tabela 8 pode-se observar os resultados obtidos.

Tabela 8: Resultados dos testes dos elementos de teste

| <b>Conjunto de fixação</b> | <b>Tipo</b> | <b>Massa [g]</b> | <b>Perda massa[g]</b> | <b>Perda de massa [%]</b> |
|----------------------------|-------------|------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1                          | A           | 345              | 1,6                   | 0,46%                     |
| 2                          | B           | 332,1            | 14,5                  | 4,18%                     |
| 3                          | A           | 343,2            | 3,4                   | 0,98%                     |
| 4                          | B           | 329,7            | 16,9                  | 4,88%                     |
| 5                          | A           | 343,5            | 3,1                   | 0,89%                     |
| 6                          | B           | 330,2            | 16,4                  | 4,73%                     |
| 7                          | A           | 340,7            | 5,9                   | 1,70%                     |
| 8                          | B           | 325,6            | 21                    | 6,06%                     |
| 9                          | A           | 344,5            | 2,1                   | 0,61%                     |
| 10                         | B           | 328,7            | 17,9                  | 5,16%                     |
| 11                         | A           | 346,5            | 0,1                   | 0,03%                     |
| 12                         | B           | 328              | 18,6                  | 5,37%                     |
| 13                         | A           | 343,5            | 3,1                   | 0,89%                     |
| 14                         | B           | 327,9            | 18,7                  | 5,40%                     |
| 15                         | A           | 344,1            | 2,5                   | 0,72%                     |
| 16                         | B           | 328,8            | 17,8                  | 5,14%                     |

Fonte: O autor

A partir deste teste, calculou-se a perda de massa pela diferença de massa perdida após o ensaio de corrosão de campo. Foi considerado o valor da massa do corpo de prova antes da instalação em campo como massa inicial.

Pode-se observar que em todos os conjuntos foi constatado perda de massa muito menor do que as verificadas inicialmente, preservando desta forma a união flangeada, evitando vazamentos e perdas para a unidade. Na figura 29 pode-se evidenciar que não ocorreram também alterações significativas nas forma geométrica dos parafusos, porcas e arruelas.

Os elementos de fixação de xylan 1070 – tipo A, apresentaram perda de massa similares em todos os conjuntos em um valor médio de 0,79%. Já os elementos de fixação de xylan 1010 – tipo B apresentaram também comportamento similares quanto a corrosão e um valor médio de 5,11%.

Figura 29: Elementos de fixação após os testes - Vista geral



Fonte: O autor

Figura 30: Elementos de fixação após os testes - Xylan 1070



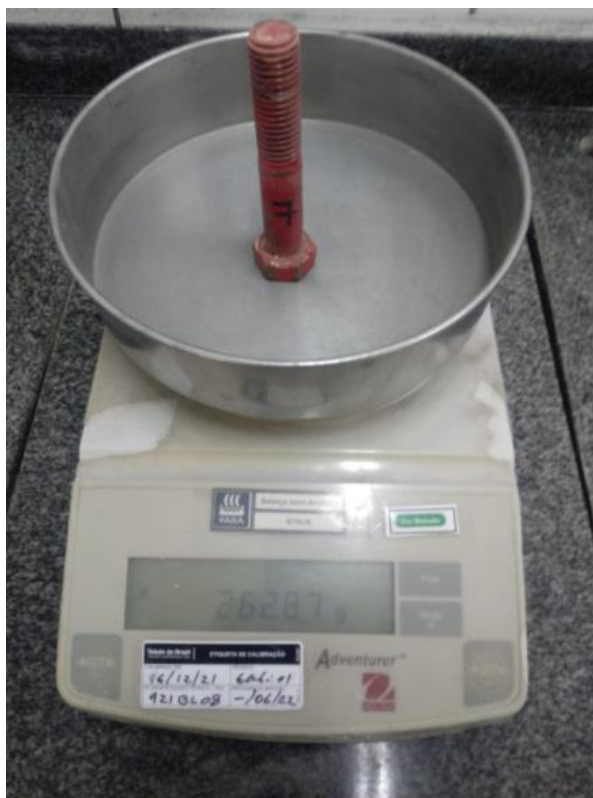
Fonte: O autor

Figura 31: Elementos de fixação após os testes - Xylan 1010



Fonte: O autor

Figura 32: Pesagem dos elementos de fixação



Fonte: O autor

Diante dos dados apresentados nos testes, pode-se observar que os elementos de fixação com xylan 1070 apresentaram melhor desempenho e possuem também o custo cerca de 20% menor que o xylan 1010, sendo assim o material alternativo recomendado para aplicação.

#### 4.6 PERDAS CAUSADAS PELA CORROSÃO DOS ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

Na base de dados da empresa, utilizando os dados de intervenções da equipe de manutenção corretiva e demais intervenções presentes e registradas no software SAP, pode-se verificar o número de intervenções e total de horas de planta parada geradas exclusivamente por problemas de corrosão nos elementos de fixação. O ano de 2020 foi utilizado para análise, conforme pode ser observado na tabela 9.

Tabela 9: Eventos de quebras por falhas devido a corrosão em elementos de fixação

| <b>Data</b> | <b>TAG</b>        | <b>Duração [horas]</b> | <b>Atividade</b>                                                |
|-------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 01/01/2019  | RIG1-0110-BB01A   | 1,00                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA JUNTA FLEXIVEL E DA VALVULA DE RETENÇÃO |
| 01/01/2019  | RIG1-0110-BB01B   | 1,17                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA JUNTA FLEXIVEL E DA SAIDA DE DESCARGA   |
| 02/01/2019  | RIG1-0110-TQ06    | 0,67                   | SUBSTITUIÇÃO DO PARAFUSO E JUNTA                                |
| 03/01/2019  | RIG1-0110-FL02    | 0,58                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE H2O                            |
| 05/01/2019  | RIG1-0110-BB06B   | 0,50                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO FLANGE                                  |
| 15/01/2019  | RIG1-0110-BB01A/B | 1,50                   | INSTALAR PARAFUSOS NO FLANGE E AGUARDAR CURA                    |
| 23/01/2019  | RIG1-0110-TQ02A   | 0,42                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO TANQUE                                  |
| 04/02/2019  | RIG1-0110-BB06    | 1,75                   | SANAR VAZAMENTO NA LINHA E SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA      |
| 07/02/2019  | RIG1-0110-FL02    | 1,08                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS DANIFICADOS DO DESLOCADOR DE PLACAS        |
| 08/02/2019  | RIG1-0110-BB01B   | 1,83                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS DOS CARRETEIS                              |
| 11/02/2019  | RIG1-0110-BB06A   | 1,33                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS E VALVULA COM PRISIONEIRO DANIFICADOS      |
| 12/02/2019  | RIG1-0110-BB04    | 0,42                   | APERTAR PARAFUSOS DA JUNTA FLEXIVEL                             |
| 26/02/2019  | RIG1-0110B-B06A   | 1,25                   | SUBSTITUIR JUNTA E PARAFUSOS                                    |
| 18/03/2019  | RIG1-0110-BB01B   | 1,83                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS E JUNTAS DA LINHA DA DESCARGA              |
| 19/03/2019  | RIG1-0110-BB06A   | 0,17                   | INSPEÇÃO NA VÁLVULA DA BOMBA, PORCAS DOS PARAFUSOS COM CORROSÃO |
| 19/03/2019  | RIG1-0110-BB06A   | 0,42                   | COLOCAR PORCAS NOS PARAFUSOS PRISIONEIRO DA VÁLVULA             |
| 29/03/2019  | RIG1-0110-BB06    | 0,75                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS E APERTO GERAL NOS PARAFUSOS               |
| 31/03/2019  | RIG1-0110-BB06A   | 1,00                   | SUBSTITUIDO PARAFUSOS E JUNTA DO FLANGE                         |
| 31/03/2019  | RIG1-0110-TQ02    | 4,33                   | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VALVULA                                 |
| 02/04/2019  | RIG1-0110-BB01    | 1,33                   | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DO CARRETEL DE DESCARGA                   |

|            |                 |      |                                                                     |
|------------|-----------------|------|---------------------------------------------------------------------|
| 03/04/2019 | RIG1-0110-BB06A | 0,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA JUNTA FLEXÍVEL                              |
| 03/04/2019 | RIG1-0110-BB06A | 1,33 | TROCA DE PARAFUSOS JUNTA FLEXIVEL                                   |
| 09/05/2019 | RIG1-0110-FL02  | 0,92 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO DESLOCADOR DE PLACAS                        |
| 26/05/2019 | RIG1-0110-BB01A | 0,50 | REAPERTO NOS PARAFUSOS DA BOMBA                                     |
| 01/06/2019 | RIG1-0110-FL02  | 0,25 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO DESLOCADOR DE PLACAS                        |
| 10/06/2019 | RIG1-0110-BB01A | 2,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE DESCARGA                           |
| 14/06/2019 | RIG1-0110-BB01B | 0,58 | SUBSTITUIDO PARAFUSO VALVULA                                        |
| 15/06/2019 | RIG1-0110-BB01A | 0,50 | APERTO NO PARAFUSOS DA VÁLVULA                                      |
| 16/06/2019 | RIG1-0110-BB06A | 0,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DAS VÁLVULAS DE DESCARGA E DRENO               |
| 23/06/2019 | RIG1-0110-FL02  | 0,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO FILTRO                                      |
| 13/07/2019 | RIG1-0110-BB02A | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DE RETENÇÃO                         |
| 16/07/2019 | RIG1-0110-FL02  | 1,00 | FEITO FIXAÇÃO NO DEGRAU DA ESCADA DE ACESSO AO FILTRO               |
| 17/07/2019 | RIG1-0110-BB02  | 1,33 | SUBSTITUIR DIAFRAGMA E PARAFUSOS DA VÁLVULA DE RETENÇÃO             |
| 24/07/2019 | RIG1-0110-BB01A | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DA TUBULAÇÃO                        |
| 13/08/2019 | RIG1-0110-FL02  | 1,33 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DOS FLANGES                                    |
| 14/08/2019 | RIG1-0110-BB01B | 0,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE SUÇÃO                              |
| 26/08/2019 | RIG1-0110-BB01B | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DOS CARRETEIS                                 |
| 26/08/2019 | RIG1-0110-BB01B | 1,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS EM FLANGE NA LINHA DE DESCARGA                 |
| 27/08/2019 | RIG1-0110-BB06A | 0,50 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS E JUNTA DO CARRETEL                           |
| 28/08/2019 | RIG1-0110-BB01A | 0,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS QUEBRADO DA VÁLVULA                            |
| 30/08/2019 | RIG1-0110-BB01A | 0,83 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE SUÇÃO E DESCARGA                   |
| 31/08/2019 | RIG1-0110FL02   | 2,08 | SANAR VAZAMENTO E SUBSTITUIR PARAFUSOS DESGASTADOS DA LINHA         |
| 04/09/2019 | RIG1-0110-BB01B | 4,00 | SUBSTITUIDO ROTOR E PARAFUSOS DA VOLUTA                             |
| 05/09/2019 | RIG1-0110-BB01B | 0,75 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DE RETENÇÃO                         |
| 07/09/2019 | RIG1-0110-CC03B | 1,25 | REVISÃO NO ROTOR, LAVAGEM DO MESMO E APERTO NOS PARAFUSOS DO MANCAL |
| 07/09/2019 | RIG1-0110-BB06A | 0,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA                                       |
| 07/09/2019 | RIG1-0110-TQ02  | 0,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DO TANQUE                           |
| 31/10/2019 | RIG1-0110-BB01A | 2,00 | SANAR VAZAMENTO NA JUNTA DE DESCARGA E SUBSTITUIR PARAFUSOS         |
| 05/11/2019 | RIG1-0110-LL02  | 2,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO FLANGE DO INJETOR                           |
| 06/11/2019 | RIG1-0110-FL02  | 2,00 | SUBSTITUIDOS PARAFUSOS DO FLANGE DA LINHA DE DESCARGA               |
| 15/11/2019 | RIG1-0110-BB01A | 1,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DAS LINHAS                                    |

|            |                 |      |                                                              |
|------------|-----------------|------|--------------------------------------------------------------|
| 19/11/2019 | RIG1-0110-BB06A | 1,00 | SUBSTITUIR JUNTA E PARAFUSOS                                 |
| 19/11/2019 | RIG1-0110-LL01  | 1,00 | SUBSTITUIR JUNTA E PARAFUSOS                                 |
| 24/11/2019 | RIG1-0110-BB01A | 2,50 | SUBSTITUIÇÃO DOS PARAFUSOS DA TUBULAÇÃO DE DESCARGA          |
| 24/11/2019 | RIG1-0110-BB05A | 2,50 | SUBSTITUIÇÃO DE VÁLVULA, PARAFUSOS E JUNTA                   |
| 26/11/2019 | RIG1-0110BB05   | 1,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DO FLANGE                              |
| 26/11/2019 | RIG1-0110BB01A  | 1,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DO CARRETEL                            |
| 27/11/2019 | RIG1-0110-BB06A | 1,17 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO FLANGE DE DESCARGA                   |
| 27/11/2019 | RIG1-0110-BB01A | 1,42 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DE RETENÇÃO                  |
| 28/11/2019 | RIG1-0110-BB01A | 1,25 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE DESCARGA                    |
| 30/11/2019 | RIG1-0110-BB01A | 0,83 | SUBSTITUIR PARAFUSO DA VÁLVULA DE RETENÇÃO                   |
| 01/12/2019 | RIG1-0110-FL02  | 1,25 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE ENTRADA D'ÁGUA              |
| 02/12/2019 | RIG1-0110-TQ06  | 0,83 | APERTO NOS PARAFUSOS DA PORTA DE VISITA                      |
| 03/12/2019 | RIG1-0110-BB01B | 0,75 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DE DESCARGA                  |
| 05/12/2019 | RIG1-0110-TQ06  | 1,75 | SANAR VAZAMENTO/ SUBSTITUIR PARAFUSOS PORTA DE VISITA        |
| 07/12/2019 | RIG1-0110-BB01A | 1,08 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DE DESCARGA                  |
| 08/12/2019 | RIG1-0110-BB05  | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DO CARRETEL                            |
| 10/12/2019 | RIG1-0110-BB03  | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DO CARRETEL                            |
| 14/12/2019 | RIG1-0110-BB01A | 1,08 | FABRICAR JUNTA E SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DE RETENÇÃO |
| 16/12/2019 | RIG1-0110-FL02  | 1,00 | SUBSTITUIÇÃO DE PARAFUSOS DANIFICADOS                        |
| 16/12/2019 | RIG1-0110-BB01A | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS                                        |
| 19/12/2019 | RIG1-0110-BB01A | 0,67 | SUBSTITUIÇÃO DE PARAFUSOS DANIFICADOS                        |
| 19/12/2019 | RIG1-0110-BB04  | 1,00 | REAPERTO NOS PARAFUSOS DA LINHA                              |
| 20/12/2019 | RIG1-0110-BB06A | 0,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA DESCARGA DA BOMBA                    |
| 29/12/2019 | RIG1-0110-BB01A | 1,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DA VÁLVULA                             |
| 30/12/2019 | RIG1-0110-BB01A | 0,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS E JUNTA DO FLANGE DA LINHA DE DESCARGA  |
| 31/12/2019 | RIG1-0110-BB01A | 2,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE DESCARGA                    |
| 06/01/2020 | RIG1-0110-BB06A | 1,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS LINHA DE DESCARGA                       |
| 06/01/2020 | RIG1-0110-LL02  | 1,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO TELEFONE                             |
| 11/01/2020 | RIG1-0110-BB01A | 1,50 | SANAR VAZAMENTO, SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE DESCARGA   |
| 12/01/2020 | RIG1-0110-BB06A | 0,75 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DE DESCARGA                  |
| 18/01/2020 | RIG1-0110-TQ02  | 0,83 | APERTO NOS PARAFUSOS DA LINHA DE SUÇÃO DO TANQUE             |

|            |                 |      |                                                            |
|------------|-----------------|------|------------------------------------------------------------|
| 23/01/2020 | RIG1-0110-BB01A | 1,33 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE DESCARGA                  |
| 15/02/2020 | RIG1-0110-LL02  | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS NO BICO DO LL02                       |
| 22/02/2020 | RIG1-0110-BB01A | 0,92 | SUBSTITUIDO OS PARAFUSOS DA JUNTA DA LINHA DE DESCARGA     |
| 27/02/2020 | RIG1-0110-BB01A | 0,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VALVULA DE DESCARGA                |
| 28/02/2020 | RIG1-0110-BB01A | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VALVULA                            |
| 29/02/2020 | RIG1-0110-BB01A | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA                              |
| 01/03/2020 | RIG1-0110-BB01A | 2,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DA BOMBA                     |
| 03/03/2020 | RIG1-0110-BB06B | 0,33 | SUBSTITUIR JUNTAS E PARAFUSOS DA VALVULA                   |
| 04/03/2020 | RIG1-0110-BB06B | 0,83 | SUBSTITUIR PARAFUSOS E REAPERTO                            |
| 04/03/2020 | RIG1-0110-FL02  | 0,83 | REAPERTO DOS PARAFUSOS DA LINHA DE DESCARGA                |
| 08/03/2020 | RIG1-0110-LL02  | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO BICO EJETOR                        |
| 08/03/2020 | RIG1-0110-LL01  | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO BICO EJETOR                        |
| 09/03/2020 | RIG1-0110-BB01A | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DO CARRETEL DE DESCARGA              |
| 10/03/2020 | RIG1-0110-LL01  | 1,00 | SANAR VAZAMENTO E SUBSTITUIR PARAFUSOS                     |
| 10/03/2020 | RIG1-0110-BB01A | 0,75 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO FLANGE E SANAR VAZAMENTO           |
| 12/03/2020 | RIG1-0110-TQ06  | 0,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA PORTA DO TANQUE                    |
| 14/03/2020 | RIG1-0110-LL01  | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSO DA CURVA                              |
| 14/03/2020 | RIG1-0110-BB01A | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VALVULA DO DRENO                   |
| 15/03/2020 | RIG1-0110-BB02  | 0,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VOLUTA                             |
| 16/03/2020 | RIG1-0110-BB02  | 1,17 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VOLUTA                             |
| 16/03/2020 | RIG1-0110-BB01A | 0,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE DESCARGA                  |
| 16/03/2020 | RIG1-0110-BB05  | 1,75 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO PRENSA GAXETA                      |
| 17/03/2020 | RIG1-0110-BB01A | 2,33 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DA VOLUTA                            |
| 17/03/2020 | RIG1-0110-TQ01  | 1,25 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA E DO FLANGE                |
| 17/03/2020 | RIG1-0110-BB01A | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO FLANGE DE DESCARGA DA BOMBA        |
| 27/03/2020 | RIG1-0110-FL02  | 0,92 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DE ENTRADA                 |
| 26/04/2020 | RIG1-0110-BB01A | 1,17 | SANAR VAZAMENTO E SUBSTITUIR PARAFUSOS CORROIDOS DO FLANGE |
| 26/04/2020 | RIG1-0110-BB05A | 0,83 | SANAR VAZAMENTO E SUBSTITUIR PARAFUSOS CORROIDOS DO FLANGE |
| 22/06/2020 | RIG1-0110-TP11  | 1,50 | REPARO E AJUSTE NA BARRA ROSQUEADA DO RASPADOR             |
| 11/07/2020 | RIG1-0110-BB06B | 0,67 | REFAZER ROSCA DO PARAFUSO DE FIXAÇÃO NA VOLUTA             |
| 13/07/2020 | RIG1-0110-AA01  | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DAS PÁS                    |

|            |                  |      |                                                           |
|------------|------------------|------|-----------------------------------------------------------|
| 18/07/2020 | RIG1-0110-BB01A  | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS NO CARRETEL DE DESCARGA             |
| 19/07/2020 | RIG1-0110-AA01   | 0,67 | REVISÃO NA PÁ DO KULMAN                                   |
| 21/07/2020 | RIG1-0110-FIC38A | 0,75 | LINHA DE ÁGUA INDUSTRIAL COM VAZAMENTO                    |
| 22/07/2020 | RIG1-0110-AA01   | 4,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS E CORREIAS                          |
| 25/07/2020 | RIG1-0110-AA01   | 2,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO ACOPLAMENTO DA PÁ DO KULMAN       |
| 18/08/2020 | RIG1-0110-FL02   | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS E JUNTAS                             |
| 20/08/2020 | RIG1-0110-BB06A  | 1,50 | SANAR VAZAMENTO DA BOMBA                                  |
| 20/08/2020 | RIG1-0110-BB08   | 1,75 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA E COMPLETAR NÍVEL DE ÓLEO   |
| 04/09/2020 | RIG1-0110-BB01A  | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DO CARRETEL DE DESCARGA             |
| 05/09/2020 | RIG1-0110-BB01B  | 0,92 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA JUNTA FLEXIVEL ENTRE FLANGES      |
| 05/09/2020 | RIG1-0110-BB01B  | 0,67 | VAZAMENTO NA VÁLVULA DE DESCARGA                          |
| 08/09/2020 | RIG1-0110-LL01   | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DO TELEFONE                         |
| 08/09/2020 | RIG1-0110-FL02   | 1,00 | TROCA DE PARAFUSO E JUNTA                                 |
| 21/09/2020 | RIG1-0110-BB01A  | 0,67 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VÁLVULA DE DESCARGA               |
| 22/09/2020 | RIG1-0110-BB06B  | 0,50 | SUBSTITUIR PARAFUSO DA DESCARGA                           |
| 25/09/2020 | RIG1-0110-LL01   | 1,17 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DANIFICADOS                          |
| 25/09/2020 | RIG1-0110-BB01A  | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS                                      |
| 27/09/2020 | RIG1-0110-BB01A  | 1,08 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE DESCARGA                 |
| 27/09/2020 | RIG1-0110-BB01A  | 1,08 | ACOMPANHAMENTO NO BLOQUEIO E DESBLOQUEIO DO EQUIPAMENTO   |
| 30/09/2020 | RIG1-0110-BB01A  | 1,83 | TROCAR PARAFUSO DA VÁLVULA                                |
| 30/09/2020 | RIG1-0110-BB02   | 1,50 | SANAR VAZAMENTO                                           |
| 01/10/2020 | RIG1-0110-BB02   | 1,00 | APERTO E SUBSTITUIÇÃO DOS PARAFUSOS DA BASE E FLANGES     |
| 04/10/2020 | RIG1-0110-FL02   | 1,00 | SANADO VAZAMENTO NA LINHA                                 |
| 11/10/2020 | RIG1-0110-BB08   | 1,17 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA LINHA DE DESCARGA DA PERÍSTALTICA |
| 14/10/2020 | RIG1-0110-SE01A  | 2,00 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS E FIXADO PROTEÇÃO                   |
| 21/10/2020 | RIG1-0110-BB05A  | 1,08 | SANAR VAZAMENTO NA LINHA DE DESCARGA                      |
| 27/10/2020 | RIG1-0110-DL01   | 1,50 | SUBSTITUIR PARAFUSOS E APERTO DE FLANGES                  |
| 03/11/2020 | RIG1-0110-TQ02   | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DA VALVULA DO DRENO                  |
| 08/11/2020 | RIG1-0110-BB06B  | 0,42 | SUBSTITUIDO PARAFUSOS DO FLANGE DA BOMBA                  |
| 20/11/2020 | RIG1-0110-DL01   | 3,50 | SUBSTITUIR TAMPA DO DILUIDOR E "TÊ"                       |
| 06/12/2020 | RIG1-0110-BB05A  | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSO E JUNTA                               |

|            |                 |      |                                                     |
|------------|-----------------|------|-----------------------------------------------------|
| 12/12/2020 | RIG1-0110-FL02  | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSO DO FLANGE DE SAÍDA AGUA FLUVIAL |
| 28/12/2020 | RIG1-0110-FL02  | 0,92 | SUBSTITUIR PARAFUSOS DO GUIA                        |
| 30/12/2020 | RIG1-0110-FL01A | 1,00 | SUBSTITUIR PARAFUSOS PORTA VISITA                   |

Fonte: Base de dados da empresa

Diante dos dados evidenciados na tabela 9, pode-se observar que no ano de 2020, exclusivamente na unidade de acidulação, ocorreram 147 intervenções totalizando 179,92 horas de unidade parada devido a corrosão em elementos de fixação. Isto corresponde a aproximadamente 7,5 dias de unidade parada durante o ano, gerando indisponibilidade elevada para a planta, bem como vazamentos e riscos à segurança ambiental e ocupacional dos colaboradores.

Exclusivamente em relação as tubulações de descarga das bombas RIG1-0110-BB01AB tivemos 56 intervenções ao longo de 2020 gerando 72,33 horas de indisponibilidade da planta.

Já, no ano de 2021, após a instalação dos elementos de fixação propostos, foi analisado o período de janeiro a abril e o número de intervenções devido a corrosão dos elementos de fixação nas tubulações da descarga das bombas RIG1-0110-BB01AB somaram apenas 1,7 horas ao todo. Ressalta-se que a única diferença entre os cenários de 2020 e 2021 foram as alterações dos elementos de fixação das tubulações de descarga das bombas.

#### 4.7 ESTIMATIVA DE GANHO

Diante do exposto no item 4.6, pode-se mensurar o ganho esperado com esta substituição dos elementos de fixação.

- Número de horas paradas 2020: 72,33 horas
- Número de horas paradas 2021 (jan a abril): 1,7 horas
- Número de horas paradas 2021 (anual): 6,8 horas
- Acréscimo de DEM = Paradas 2020 – paradas 2021 = 72,33 – 6,8 = 65,53 horas

Na tabela 10 pode-se observar a estimativa da perda financeira por hora de produção interrompida na unidade de acidulação.

Tabela 10: Estimativa perda de produção por hora

| <b>Unidade</b> | <b>Produção<br/>Ton/h</b> | <b>Custo<br/>ton/h<br/>(U\$)</b> | <b>Perda por<br/>hora de<br/>produção U\$</b> | <b>Custo<br/>do<br/>Dolar \$</b> | <b>Perda por hora de<br/>produção R\$<br/>(Reais)</b> |
|----------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| RIG1-0110      | 70                        | 18,67                            | 1306,9                                        | 5,69                             | R\$ 7.436,26                                          |

Fonte: Empresa objeto de estudo

Diante disso, pode-se mensurar a estimativa de ganho financeiro direto para empresa objeto de estudo.

- Estimativa de ganho = 65,53 horas x R\$ 7.436,26 = R\$ 487.298,12 por ano  
hora

Diante dos resultados obtidos, pode-se observar a relevância deste estudo e os inúmeros benefícios ocasionados pela aplicação dos elementos de fixação propostos por meio deste trabalho.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- Os elementos de fixação que são utilizados atualmente nas tubulações da fábrica objeto de estudo possuem baixíssima resistência quanto à corrosão, justificando desta forma o estudo aprofundando sobre o tema;
- O meio em que os elementos de fixação estão inseridos possuem alta corrosividade, sobretudo para materiais de aço carbono;
- A corrosão se dá principalmente por contaminação dos líquidos e vapores do processo de lavagem de gases;
- O material alternativo que apresentou melhores características quanto à corrosão foram os revestidos com **xylan 1070**, tendo também o custo mais baixo dentre os elementos alternativos analisados;
- O ganho financeiro para empresa com o aumento de produtividade nas trocas dos elementos de fixação, redução de paradas de fábrica e número de trocas necessárias é estimado em **500 mil reais ao ano**. Sendo assim, é altamente recomendado que a empresa realize imediatamente a substituição dos elementos de fixação existentes pelos indicados neste estudo. Além disso, esta iniciativa pode ser expandida para outras unidades da empresa maximizando os benefícios já citados neste estudo.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A seguir, algumas sugestões de futuras pesquisas:

- Utilização de parafusos com revestimento xylan 1070 em estruturas metálicas na indústria de fertilizantes.
- Estudo da aplicabilidade e viabilidade da utilização de parafusos revestidos com xylan 1070 em tubulações industriais na indústria de fertilizantes.
- Utilização de parafusos com revestimento xylan 1070 em bombas centrífugas na indústria de fertilizantes.

## 7. REFERÊNCIAS

ASTM G1 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens. 2010.

CALABRESE, L; PROVERBIO, E; POLLICINO, E; GALTIERI, G; BORSELLINO, C. **Effect of galvanic corrosion on durability of aluminium/steel self-piercing rivet joints**. Corros Eng, Sci Technol 50(1), p. 10–17, 2015. Percentil Scopus: 55%

CALLISTER JR., W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHUNG, Ping Ping; WANG, James; DURANDET, Yvonne. Deposition processes and properties of coatings on steel fasteners—A review. **Friction**, p. 1-28, 2019. Percentil Scopus: 92%

COTTIS, R. A. **Hydrogen embrittlement**. Shreir's Corrosion 2: 902–922, 2010.

DAVIS, J. R. **Forms of corrosion: Recognition and prevention**. In Corrosion—Understanding the Basics. Davis. J. R, Ed. Ohio: ASM International, p. 99–192, 2000.

DONALD WARREN, G. W. BECKMAN, Sulfide Corrosion Cracking Of High Strength Bolting Materials, CORROSION. 1957;13(10):33-48.

E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos da metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

FRAUCHES-SANTOS, Cristiane et al. A corrosão e os agentes anticorrosivos. **Revista virtual de química**, v. 6, n. 2, p. 293-309, 2014.

GARVERICK, Linda (Ed.). **Corrosion in the petrochemical industry**. ASM international, 1994.

KARDEC, A; NASCIF, J. **Manutenção Função Estratégica**. Quality Mark Manutenção, Abraman 2ª edição. Rio de Janeiro, 2004.

KRÜGER, L; MANDEL, M. **Electrochemical behaviour of aluminium/steel rivet joints**. Corrosion Science 53(2), p. 624–629, 2011. Percentil Scopus: 93%

MOUBRAY, J. **Reliability-Centered Maintenance (RCM): Manutenção Centrada em Confiabilidade**. 2. ed. Lutterworth, Inglaterra: Aladon, 2000.

PANNONI, F. DOMINGOS. Fundamentos da corrosão. **Princípios Da Proteção de Estruturas Metálicas Em Situação de Corrosão e Incêndio**. Aço Minas AS, 2007.

PANOSSIAN, Z., ALMEIDA, N.L.D., SOUSA, R.M.F.D., PIMENTA, G.D.S., MARQUES, L.B.S. pipes and tanks by concentrated sulfuric acid: a review. **Corrosion Science**. 2012. Percentil Scopus: 93%

POLOPONSKY, I. B. **Aspectos Metalúrgicos e de Resistência à Corrosão de Juntas Soldadas com Processo de Soldagem de Topo por Resistência**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

RIEDER, E. S. et al. Investigação dos principais processos de corrosão em estações de energia elétrica do Estado do RS. **Revista matéria**. Rio de Janeiro. Vol. 14, n. 3 (3º trimestre 2009), p. 1000-1014, 2009. Percentil Scopus: 14%

DEAN, S. W.; GRAB, G. D. Corrosion of carbon steel by concentrated sulfuric acid. **Materials Performance**, v. 24, 1985.

SATOW, A. Mechanical plating. In ASM Handbook, Volume 5—Surface Engineering. Cotel C M, Sprague J A, Smidt Jr F A, Eds. Ohio: ASM International, 1994: 330–332.

WOLYNEC, S.; WEXLER, S. B.; FENILI, C. **Manual de Proteção Contra Corrosão Durante o Transporte e Armazenamento**, São Paulo, 2 ed., Cap 1, 1992.

## 8. APÊNDICE A

### REFERÊNCIAS POR TIPO



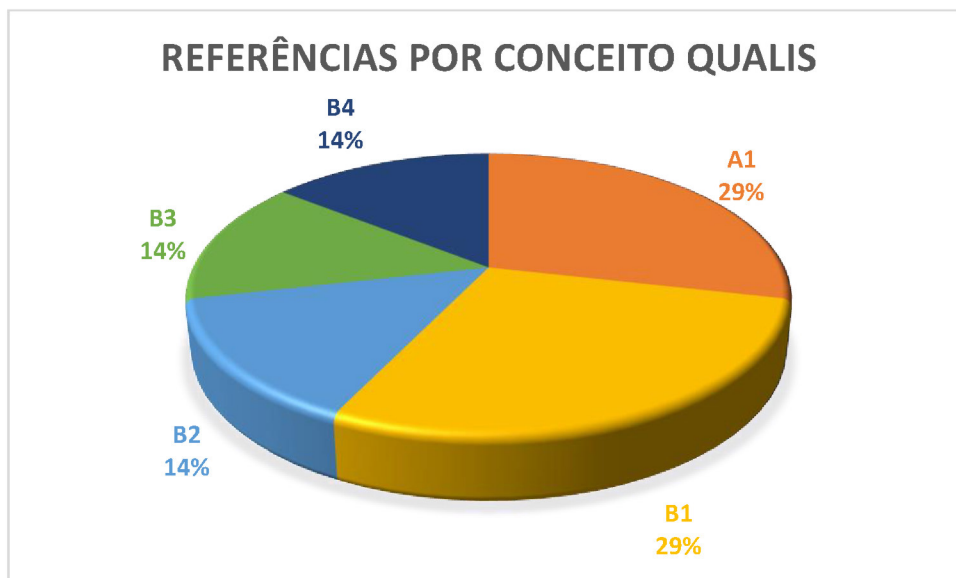
## 9. APÊNDICE B

### REFERÊNCIAS POR ANO



## 10. APÊNDICE C

### REFERÊNCIAS POR CONCEITO QUALIS



## 11. ANEXOS